



**Emanuel Duarte
Pereira**

**BETÃO MULTIFUNCIONAL PARA GESTÃO DE
INFRAESTRUTURAS**



**Emanuel Duarte
Pereira**

BETÃO MULTIFUNCIONAL PARA GESTÃO DE INFRAESTRUTURAS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Barreto Cachim, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

À minha irmã Mafalda, e aos meus pais Maria e Fernando.

o júri

presidente

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues

professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutor André Oliveirinha Monteiro

engenheiro projetista na empresa R5e Consulting Engineers, Lda

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim

professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero expressar a minha sincera gratidão a todas as pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram e acompanharam ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus pais e irmã, pelo amor incondicional, pela amizade, pelos sacrifícios, por me ajudarem a crescer, a ensinarem-me os valores da vida e por acreditarem sempre em mim, estou eternamente grato.

À minha família próxima pelo carinho e apoio constante que demonstram todos os dias.

Ao Professor Paulo Cachim, meu orientador, pela motivação, pela disponibilidade e por todos ensinamentos transmitidos, o meu obrigado.

Ao André Monteiro, por toda a ajuda e partilha de conhecimento, disponibilidade demonstrada e facilidade de comunicação.

Ao Professor Pedro Fonseca por todos os ensinamentos transmitidos na área da eletrónica.

À Eng^a Maria Carlos e ao Vítor Rodrigues pelo apoio constante durante todo o meu trabalho realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

A todos os meus professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos amigos que fiz no curso, com especial agradecimento à Margarida Ferreira e Sara Magalhães, pela amizade, pelas constantes palavras de apoio e incentivo em todos os momentos, por toda a ajuda, indispensável para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos amigos de sempre, Daniel Ferreira, Emanuel Santos, Mário Santos e Paulo Cunha, pelo apoio e amizade.

À restante família e amigos pelas palavras de incentivo.

A todos, muito obrigado por tudo!

palavras-chave

Piezoresistividade, monitorização estrutural, betão piezoresistivo, sensores de deformação à base de betão piezoresistivo, negro de fumo.

resumo

As infraestruturas de engenharia civil são suscetíveis à degradação devido às diferentes solicitações a que estão sujeitas durante o seu tempo de serviço. Uma vez deteriorados, os materiais não voltam a desempenhar devidamente as funções para as quais foram projetados, necessitando de intervenções de forma a evitar a perda de funcionalidade da estrutura. A adequada monitorização estrutural destas infraestruturas é essencial para o aumento significativo do seu tempo de vida útil, no entanto os sistemas de monitorização convencionais são usualmente constituídos por sensores externos à estrutura que apresentam diversos inconvenientes, como custos elevados, problemas na interface e compatibilidade com a estrutura de suporte. Com os recentes avanços na área da nanotecnologia, foi possível desenvolver uma nova família de betões com capacidades autosensíveis, adicionando nano partículas condutoras e semicondutoras à sua composição, originando assim um material compósito multifuncional com a capacidade de monitorização de infraestruturas a longo prazo. O foco principal desta dissertação é o desenvolvimento de um sensor de deformação com a adição de uma substância condutora à sua matriz, nomeadamente o negro de fumo, para que num futuro próximo possa vir ser utilizado para gestão e monitorização de infraestruturas rodoviárias a longo prazo.

keywords

Piezoresistivity, structural monitoring, piezoresistive concrete, deformation sensors based on piezoresistive concrete, carbon black.

abstract

Civil engineering infrastructures are susceptible to degradation due to the different requests they are subjected during their time of service. Once deteriorated, the materials do not properly perform the functions for which they were designed, requiring interventions in order to avoid the loss of functionality of the structure. Proper structural monitoring of these infrastructures is essential for a significant increase in their lifetime, however, conventional monitoring systems are usually constituted by sensors external to the structure that have several drawbacks, such as high costs, interface problems and compatibility with support structure. With recent advances in the field of nanotechnology, it was possible to develop a new family of concretes with self-sustaining capabilities, adding conductive and semiconductive nanoparticles to their composition, thus giving rise to a multifunctional composite material with long term infrastructure monitoring capability. The main focus of this dissertation is the development of a deformation sensor with the addition of a conductive substance to its matrix, namely carbon black, so that in the near future it can be used for management and monitoring of long-term road infrastructures.

Índice

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1 Enquadramento temático..... | 1 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 2. Princípios da eletrónica | 3 |
| 3. Betão multifuncional para gestão de infraestruturas | 9 |
| 3.1 Betão “inteligente” | 10 |
| 3.2 Betão piezoresistivo | 10 |
| 3.3 Materiais condutores | 11 |
| 3.3.1 Fibras de carbono | 11 |
| 3.3.2 Fibras de aço..... | 12 |
| 3.3.3 Nanotubos de carbono | 13 |
| 3.3.4 Negro de fumo..... | 13 |
| 3.4 Monitorização em tempo real..... | 15 |
| 4. Caracterização e desenvolvimento dos sensores de betão com adição de negro de fumo..... | 19 |
| 5. Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados..... | 31 |
| 6. Ensaio laboratoriais | 37 |
| 7. Análise de resultados..... | 45 |
| 8. Conclusões e trabalhos futuros..... | 61 |
| 8.1 Principais conclusões | 61 |
| 8.2 Perspetiva de trabalhos futuros | 62 |
| Referências Bibliográficas..... | 64 |
| ANEXOS | 67 |

1. Introdução

1.1 Enquadramento temático

A maioria das infraestruturas existentes são construídas em betão e, devido à sua degradação ao longo do tempo, surgiu a necessidade de controlar e monitorizar o estado de degradação das mesmas.

Os compósitos “inteligentes” à base de cimento piezoresistivo com capacidades autosensíveis são bastante úteis para a monitorização estrutural da saúde de infraestruturas a longo prazo. Nos últimos anos, têm vindo a desenvolver-se este tipo de compósitos adicionando nano partículas condutoras e semicondutoras verificando que para além de terem a capacidade de auto detetar a sua própria tensão, também são duráveis e compatíveis com as estruturas de betão (Li, Xiao, & Ou, 2008).

O desenvolvimento da monitorização estrutural da saúde de infraestruturas permite uma avaliação mais eficaz das tensões e deformações que ocorrem nas infraestruturas. No entanto não só os edifícios, pontes e barragens podem beneficiar desta tecnologia, a monitorização de vias de circulação é também alcançável. Esta monitorização é realizada com o auxílio de um *software* de computador de forma a recolher informações de parâmetros críticos da infraestrutura, como a taxa de corrosão, a abertura de fendas, cargas, humidade e o pH (Monteiro, Cachim, & Costa, 2017). De forma a realizar esta monitorização é necessário colocar sensores de deformação à base de cimento piezoresistivo obtidos através da adição de materiais condutores no betão, em pontos estratégicos da infraestrutura (Han & Ou, 2007).

Estes sensores, podem ser realizados com compósitos de matriz cimentícia piezoresistiva, que é um material relativamente recente, que ainda se encontra em fase de desenvolvimento, e que atraiu muita atenção da comunidade científica e profissional devido ao seu elevado desempenho em condutividade elétrica, baixo custo e elevadas propriedades mecânicas (Chen *et al.*, 2017).

Atualmente, ainda se encontra em fase de estudo, procurando-se manipular estes compósitos de forma a substituir os materiais frequentemente usados na construção por materiais mais eficientes e multifuncionais (Monteiro, 2017).

1.2 Objetivos

O foco principal deste trabalho é tirar partido da capacidade piezoresistiva do betão adicionando materiais condutores elétricos como o negro de fumo, originando assim um material compósito multifuncional com a capacidade de monitorizar, a longo prazo, infraestruturas como vias, pontes e edifícios.

Estes compósitos multifuncionais com capacidade de monitorização, ou sensores de deformação com matriz cimentícia piezoresistiva, foram desenvolvidos em laboratório com o intuito de no futuro poderem ser implementados nas vias de circulação automóvel e, com a devida monitorização e a interação da roda do veículo com os sensores aplicados, ser possível, por exemplo, verificar a sua degradação e fissuração da superfície da via com a passagem do mesmo, a velocidade ou realizar a sua pesagem em movimento.

A utilização deste tipo de monitorização pode ser muito vantajosa, isto devido ao facto de ser possível realizar a monitorização da infraestrutura em tempo real, permitindo assim realizar qualquer intervenção necessária num espaço de tempo mais reduzido, não só melhorando a vida da infraestrutura a longo prazo, como também a segurança e viabilidade da mesma.

Neste trabalho apresentam-se os resultados de uma campanha experimental para a determinação da percentagem de negro de fumo a utilizar na composição do betão, de forma a otimizar o desempenho e a capacidade de condução elétrica do sensor. Um estudo realizado por Monteiro *et al.*, (2017) diz que a percentagem ideal de negro de fumo com vista a melhorar o desempenho mecânico do betão é de aproximadamente 4%, enquanto que percentagens entre 7 e 10% são mais focadas para fins de deteção e monitorização.

2. Princípios da eletrónica

O presente capítulo apresenta resumidamente os princípios gerais da eletrónica, sendo a compreensão dos conceitos apresentados fundamental para perceber o trabalho laboratorial realizado nesta dissertação.

A quantidade elétrica fundamental presente num circuito elétrico é a **carga elétrica** (Q) e tem como unidade padrão o Coulomb representada pela letra C . A física elementar diz-nos que toda a matéria é constituída por átomos, estes são constituídos por um núcleo central composto por prótons e neutrões rodeado por uma nuvem de eletrões. A carga elétrica pode ser negativa ou positiva se for transportada por eletrões ou prótons respetivamente e tem uma quantidade aproximada de $1.602 \times 10^{-19}C$. Tendo em consideração a lei da conservação da carga é possível afirmar que a carga não pode ser criada ou destruída apenas transferida, por esse motivo a soma algébrica de cargas num sistema não se altera. Enquanto as cargas positivas se movem numa direção as cargas negativas movem-se no sentido oposto, uma propriedade única da carga elétrica é o facto de esta se mover, este movimento constante é o que vai gerar a **corrente elétrica** (Alexander & Sadiku, 2001).

A **corrente elétrica** (I) é geralmente referida como corrente ou fluxo de corrente sendo convencional referir este fluxo como o movimento das cargas positivas e tem como unidade padrão o *Ampere* (A) sendo que $1A = \text{coulomb}/\text{segundo}$. É definida como a taxa de tempo de mudança de uma carga que passa por uma determinada área, normalmente esta área é uma área de seção transversal de um fio de metal como pode ser observado na **Figura 1** (Moglen, 2015).

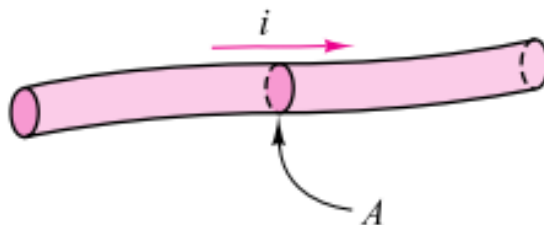


Figura 1. Fluxo de corrente num condutor elétrico (retirado de Moglen, 2015)

A corrente elétrica é calculada dividindo a carga elétrica (Q) pelo tempo (t) como indicado na **Equação 1**.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

A quantidade de carga que passa num condutor elétrico numa determinada quantidade de tempo é definida como a corrente elétrica (FAA & ASA, 1999).

A carga que se desloca num circuito elétrico dá origem a uma corrente elétrica e, naturalmente é necessário trabalho ou energia para que a carga se mova entre dois pontos no circuito. O trabalho total por unidade de carga associado com o movimento da carga entre dois pontos é denominado por **tensão (U)**, ou **diferença de potencial** cuja unidade padrão é o volt (V) em que $1\text{ V} = 1\text{ joule/coulomb}$. O papel desempenhado por uma fonte de tensão num circuito elétrico é equivalente ao desempenhado pela força da gravidade (Moglen, 2015).

Os materiais em geral têm um comportamento característico em resistir ao fluxo de corrente elétrica, esta propriedade física é conhecida como a **resistência (R)** e é expressa em Ohms (Ω) sendo $1\ \Omega = 1\text{ V/A}$ (Alexander & Sadiku, 2001).

A resistência de um condutor vai determinar a quantidade de corrente que flui sob uma determinada tensão, na maioria dos casos quanto maior for a resistência do circuito menor será a corrente, se a resistência for reduzida isso vai implicar um acréscimo de corrente (FAA & ASA, 1999). Esta relação é conhecida como a **lei de Ohm** e é expressa pela **Equação 2**.

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

A tensão de um elemento é diretamente proporcional ao fluxo de corrente elétrica. Quando a corrente elétrica flui através de um cabo de metal ou através de outro circuito, encontra uma certa quantidade de resistência cuja magnitude depende das propriedades elétricas do material, no entanto, esta resistência pode ser indesejada, (*e.g.* fios de ligação). Praticamente todos os elementos dos circuitos exibem alguma resistência, como consequência, a corrente elétrica que flui através de um elemento fará com que a energia se dissipe sob a forma de calor (Moglen, 2015).

É importante referir que um dos principais fatores que influenciam a resistência é a temperatura. No entanto algumas substâncias, como o carbono, mostram um decréscimo de resistência enquanto a temperatura ambiente aumenta, a maior parte dos materiais usados como condutores aumentam de resistência à medida que a temperatura aumenta (FAA & ASA, 1999).

A resistência depende de uma propriedade denominada por **resistividade** (ρ), cuja unidade padrão é o ohm metro ($\Omega.m$) e representa a resistência de um material (*e.g.* fio de ligação) de área de secção transversal (A) sobre o comprimento do mesmo (l) e pode ser expressa pela **Equação 3**.

$$\rho = \frac{A}{l} R \quad (3)$$

Ao colocar a resistência em evidência é possível obter a **Equação 4**, sendo então possível concluir que a resistência é diretamente proporcional à resistividade, ou seja, quanto maior for a resistividade do material maior será a sua resistência.

$$R = \frac{l}{A} \rho \quad (4)$$

A **Figura 2** mostra como a geometria de um elemento vai influenciar a resistência do mesmo, quanto maior for a área da secção transversal menor será a sua resistência.

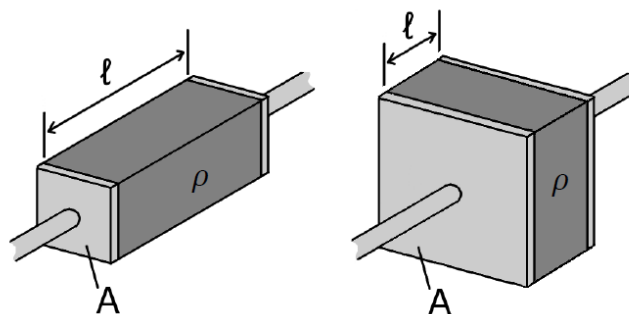


Figura 2. Influência da geometria do elemento na resistência elétrica (retirado de André O. Monteiro, 2017)

Bons condutores, tais como, o cobre e o alumínio, possuem resistividades baixas, enquanto os materiais isolantes como a mica e o papel possuem altas resistividades. Supercondutores não possuem resistividade, ou seja, a energia não é dissipada (Chary, 1951; Alexander & Sadiku, 2001).

O inverso da resistividade é uma propriedade intitulada de **condutividade** (σ) e é obtida a partir da **Equação 5**.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

O **condensador** é um dispositivo cuja principal função é armazenar energia em forma de corrente elétrica. A configuração de um condensador consiste em duas placas condutoras paralelas com uma determinada área de secção transversal (A) separadas por um elemento dielétrico, ou seja, um tipo de material que não é condutor elétrico (*e.g* isolante). Quando uma fonte de tensão é aplicada a um condensador, esta deposita uma carga positiva (q) numa placa e uma carga negativa ($-q$) na outra como pode ser observado na **Figura 3**, a quantidade de carga acumulada é denominada por **capacidade** (C) do condensador e pode ser obtida de acordo com a **Equação 6**.

$$Q = CU \quad (6)$$

A unidade padrão da capacidade é o farad (F) em que $1 F = 1 \text{ coulomb/volt}$.

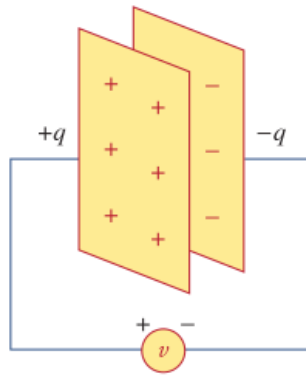


Figura 3. Aplicação de uma fonte de tensão num condensador (retirado de Alexander & Sadiku, 2001)

Embora a capacidade do condensador seja a razão da carga por placa com a tensão aplicada, esta não depende da carga nem da tensão, mas sim das dimensões físicas do condensador, como é possível observar pela **Equação 7**.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (7)$$

Em que A é a área de cada placa, d é a distância entre placas e ε é a permissividade do material dielétrico, no entanto é de notar que a **Equação 7** é aplicada apenas a

condensadores com placas paralelas. Na **Figura 4** representa-se um condensador de placas paralelas.

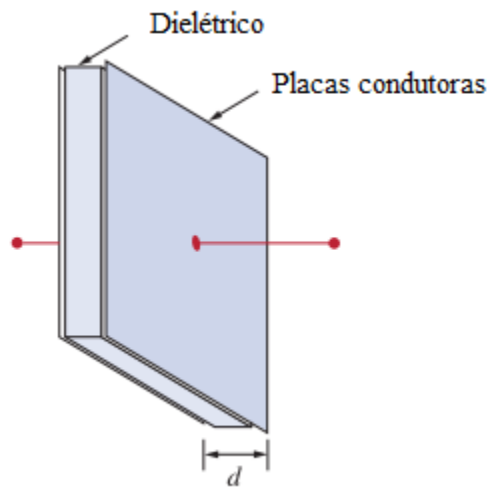


Figura 4. Condensador de placas paralelas (adaptado de Alexander & Sadiku, 2001)

Apesar da **Equação 7** se aplicar apenas a condensadores com placas paralelas, em geral existem três fatores que determinam o valor da capacidade de um condensador, nomeadamente: A área das placas condutoras – quanto maior for a área, maior será a capacidade; O espaçamento entre placas – quanto menor for o espaçamento, maior será a capacidade; A permissividade do material dielétrico – quanto maior a permissividade, maior a capacidade (Moglen, 2015; Alexander & Sadiku, 2001).

A definição de tensão como trabalho total por unidade de carga leva à introdução de **potência (P)**, sendo esta definida como o trabalho total por unidade de tempo. Assim a potência gerada ou dissipada por um circuito elétrico é expressa pela **Equação 8** e tem como unidade padrão o watt (W) sendo $1\ W = 1\ joule/segundo$.

$$P = UI \quad (8)$$

No entanto é necessário fazer a distinção dos sinais de potência. Um valor positivo significa que o circuito elétrico está a dissipar energia, enquanto um valor negativo significa que existe produção de energia (Chary, 1951; Moglen, 2015)

3. Betão multifuncional para gestão de infraestruturas

O betão é o segundo recurso mais utilizado no mundo depois da água. A maioria das infraestruturas nos dias de hoje são construídas em betão. No entanto, devido à degradação do betão e à ausência de manutenção, de ferramentas avançadas de avaliação de condições e *design*, muitas estruturas apresentam vários problemas, havendo a necessidade de implementar esforços significativos de forma a transformar as infraestruturas degradadas em infraestruturas úteis e seguras (Han, Ding, & Yu, 2015).

Nos últimos tempos, muitos investigadores têm estado focados no desenvolvimento de materiais à base de cimento com capacidade de realizar tarefas autónomas sem a necessidade de dispositivos externos, estes materiais são denominados por compósitos multifuncionais à base de cimento (Monteiro, 2017). No entanto é necessário explicar do que se trata um material compósito. Este tipo de material, também conhecido como material de composição ou, simplesmente compósito é um material que surge da combinação de dois ou mais materiais diferentes que formam uma estrutura. Surge então um novo tipo de material, que tem propriedades e características diferentes dos materiais que foram combinados. A razão pela qual o compósito é produzido é que este terá melhores propriedades tanto a nível físico como químico em relação às propriedades dos materiais individuais (Smith, 2017).

O betão multifuncional fornece uma nova abordagem para o uso eficiente e sustentável no desenvolvimento de materiais e estruturas de betão, sendo um material que pode ser utilizado para desenvolver infraestruturas inteligentes com capacidade de monitorização do estado da infraestrutura, melhorando assim a manutenção, segurança, viabilidade, durabilidade e consequentemente o meio ambiente.

De forma a obter tais funcionalidades, é necessário adicionar misturas específicas na composição do betão, das quais resultam matrizes de cimento funcionais com estruturas de múltiplas fases e escalas bastante complexas (Han, Ding, & Yu, 2015; Monteiro, 2017). A partir da **Figura 5** é possível observar a macro e a microestrutura de um betão multifuncional genérico.

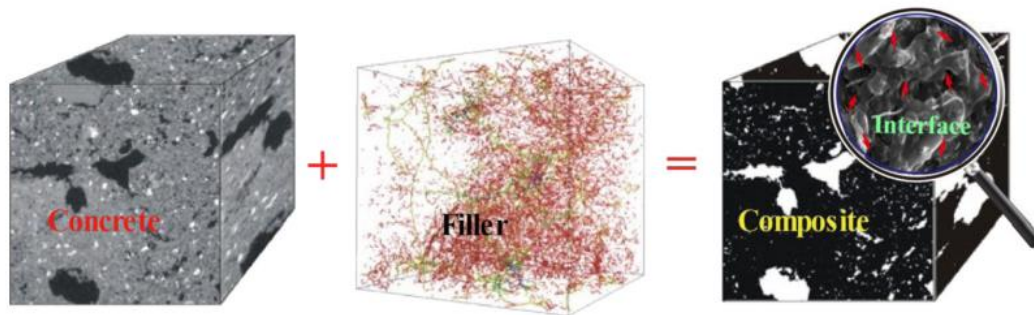


Figura 5. Betão multifuncional genérico (retirado de Han *et al.*, 2015)

O betão multifuncional pode ser considerado um material de duas fases a nível macroscópico. A primeira consiste na fase de enchimento, sendo esta distribuída na matriz de betão formando assim uma rede condutora. A segunda é a fase da matriz de betão, que suporta os enchimentos funcionais e é composta por agregados minerais ligados com auxílio de uma mistura ligante, sendo esta constituída por cimento, asfalto ou polímeros (Han, Ding, & Yu, 2015; Monteiro, 2017).

3.1 Betão “inteligente”

Devido aos avanços da nanotecnologia nos últimos anos, foi possível criar o que se chama de materiais “inteligentes”, que podem substituir, em último recurso, as funções atualmente executadas pela instrumentação. Este material, para além de não necessitar de dispositivos externos, tem o potencial de melhorar as propriedades físicas dos materiais de construção usados normalmente, (*e.g.* betão). Assim, elementos estruturais como vigas, pilares e paredes podem tornar-se “inteligentes”, sendo possível detetar a tensão, temperatura, humidade, utilizar painéis ativos de forma a acumular energia solar ou mesmo terem a capacidade de se reparar quando forem detetadas microfissuras no betão.

Apesar do investimento inicial ser elevado, o betão “inteligente” representa uma boa solução alternativa ao betão normalmente utilizado, pois os custos de manutenção tendem a ser mais reduzidos e a vida útil da infraestrutura seria aumentada (Monteiro, Loredó, Costa, Oeser, & Cachim, 2017).

3.2 Betão piezoresistivo

A piezoresistividade é uma propriedade física dos materiais e é definida como a mudança da resistividade elétrica quando sujeita a uma tensão mecânica. Resulta da variação da resistência de contacto entre os enchimentos elétricos, cargas elétricas e entre materiais à

base de cimento sob uma carga compressiva (Monteiro, Cachim, & Costa, 2017; Han & Ou, 2007).

De forma a induzir o efeito piezoresistivo em materiais à base de cimento, é necessário adicionar substâncias condutoras à matriz, como as fibras de carbono, nanotubos de carbono ou o negro de fumo, aumentando assim a sua condutividade elétrica (Monteiro, 2017; Azhari & Banthia, 2012).

A capacidade piezoresistiva de um material é quantificada pelo parâmetro GF (*gauge factor*) e é definido pelo quociente entre a variação da resistência elétrica ($\Delta R/R$) de um componente metálico e a sua deformação ($\Delta L/L$) devido à tensão ou compressão (Monteiro, 2017), o *gauge factor* pode então ser obtido de acordo com a **Equação 9**.

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (9)$$

3.3 Materiais condutores

Como referido anteriormente, o efeito piezoresistivo pode ser induzido em materiais à base de cimento adicionando substâncias condutoras à sua matriz. Estas substâncias são constituídas por produtos metálicos e derivados do carbono, como as fibras de aço, fibras de carbono, nanotubos de carbono e negro de fumo (Monteiro, 2017).

Seguidamente são descritas as principais substâncias consideradas como materiais condutores, com principal destaque para o negro de fumo, sendo esta a substância que vai ser utilizada na realização dos trabalhos laboratoriais.

3.3.1 Fibras de carbono

Este material compósito é um polímero reforçado com fibra onde os reforços são fibras de carbono. As fibras de carbono são rígidas, fortes e termicamente estáveis podendo suportar grandes variações de temperatura. São também muito leves tendo vantagem em relação aos metais geralmente utilizados como o aço, pois o peso das infraestruturas é um grande fator na área da engenharia civil. As fibras de carbono têm alta capacidade de condução elétrica, o que pode ser uma vantagem ou desvantagem dependendo de como, onde e a que propósito vão ser utilizadas (Smith, 2017).

As fibras de carbono são menos dispendiosas e de particular interesse pois, não só aumentam as propriedades mecânicas, como a resistência à fratura e a capacidade de deformação bem como a condutividade. Segundo Azhari & Banthia (2012) o betão composto por fibras de carbono provou ser bastante eficaz na monitorização de tráfego, como na pesagem de veículos em movimento bem como na monitorização da deformação e da formação de fendas no pavimento rodoviário. Na **Figura 6** é possível observar as fibras de carbono no seu estado natural e quando aplicadas a um compósito de cimento.

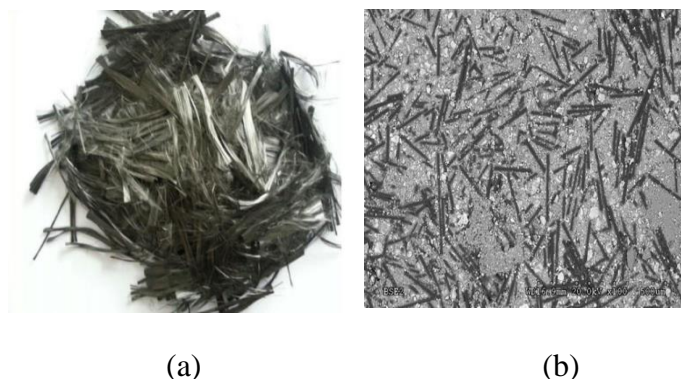


Figura 6. **a)**- Fibras de carbono (retirado de Monteiro, 2017), **b)**- Fibras de carbono num compósito de cimento ampliado 100 vezes (retirado de Azhari & Banthia, 2012)

3.3.2 Fibras de aço

As fibras de aço são ainda mais condutoras que as fibras de carbono e são utilizadas como reforço em compósitos de cimento de forma a melhorar as propriedades de tração, flexão e corte, a resistência à abrasão, a diminuição do encolhimento por secagem e o fornecimento de uma resistividade elétrica controlada (**Figura 7**). No entanto o maior diâmetro das fibras de aço comparado com as fibras de carbono é a razão pela qual as fibras de aço possuem um desempenho inferior em relação às fibras de carbono (Chung, 2002).



Figura 7. Fibras de aço convencionais (retirado de Monteiro, 2017)

3.3.3 Nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono são componentes bastante caros em relação aos outros materiais condutores e são geralmente utilizados em áreas como a nanotecnologia, eletrónica e ótica sendo a aplicação mais comum o reforço estrutural de infraestruturas. São extremamente fortes, duráveis e rígidos e, por outro lado, extremamente mais leves do que qualquer outro compósito devido à sua nano-estrutura. Os nanotubos de carbono podem ter estruturas diferentes, comprimento, espessura e uma quantidade diferente de camadas. De acordo com o número de camadas existem dois tipos principais de nanotubos de carbono, os de parede simples e os de múltiplas paredes, sendo que os de múltiplas paredes podem ser constituídos por até 100 tubos ou paredes. Uma das suas propriedades mais importantes é a sua capacidade de condução elétrica, podendo conduzir a eletricidade ainda melhor que o cobre (Smith, 2017).

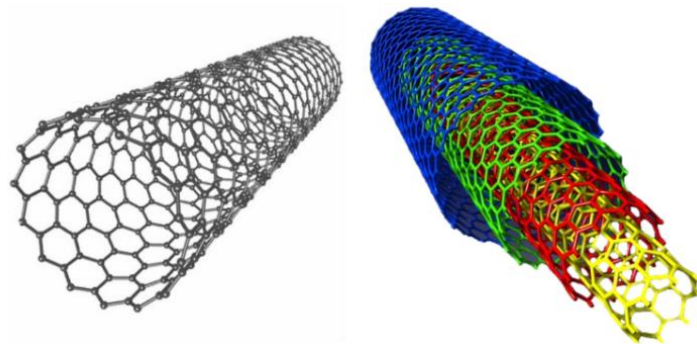


Figura 8. Nanotubos de carbono com parede simples (esquerda) e múltiplas paredes (direita) (retirado de International Carbon Black Association, 2017)

3.3.4 Negro de fumo

Os produtos modernos de negro de fumo são descendentes diretos das chamadas “lâmpadas negras” originadas na China antiga há mais de 3500 anos que eram utilizadas para a pigmentação de tintas, no entanto não eram muito puras e diferiam bastante da composição química do negro de fumo atual. Desde meados da década de 1970, a maioria dos negros de fumo começou a ser produzido pelo processo do forno de óleo, também conhecido como “forno negro” (*International Carbon Black Association*, 2017). É um carbono elementar praticamente puro com a forma de nanopartículas coloidais, sendo estas constituídas por peças gráficas e amorfas, aglomeradas com tamanhos médios

entre 10 e 100 *nm*, dependendo do mecanismo de formação (Pawlyta, Rouzaud, & Duber, 2015), que são produzidas por combustão incompleta ou decomposição térmica de hidrocarbonetos gasosos ou líquidos em condições controladas. A estrutura nanométrica do negro de fumo é um dos fatores principais que faz com que este seja altamente compressível. Devido à sua compressibilidade, o negro de fumo pode propagar-se ao ser comprimido, esta propagação melhora a sua condutividade elétrica (Wen & Chung, 2007).

Existem dois processos que produzem praticamente todo o negro de fumo existente no mundo, estes são conhecidos como o “forno negro” e o “negro térmico”, sendo o processo do “forno negro” o mais comum. O processo do “forno negro” utiliza óleos aromáticos como matéria prima, o forno de produção utiliza um reator fechado de forma a atomizar o óleo em condições extremamente controladas de temperatura e pressão. A matéria prima é introduzida numa corrente de gás quente, onde se vaporiza formando partículas de carbono microscópicas. Na maioria dos reatores, a taxa de reação é controlada por vapores ou pulverizadores de água. O negro de fumo produzido é então transportado através do reator, arrefecido e recolhido em filtros num processo contínuo (*International Carbon Black Association*, 2017). A sua aparência física é a de um pó negro finamente dividido (**Figura 9**), é utilizado em pneus, borracha e produtos de plástico, tintas de impressão e revestimentos. Está relacionado com propriedades de área superficial específica, tamanho da partícula, estrutura, condutividade e cor. A comunidade científica considera que o negro de fumo é um material não tóxico, e como não é solúvel em água, a sua propagação através de águas subterrâneas é pouco provável (Monteiro *et al.*, 2017). Aproximadamente 90% do negro de fumo é utilizado em aplicação de borracha, 9% como pigmento e 1% para as numerosas aplicações possíveis como proteção ultravioleta ou agentes condutores elétricos (*International Carbon Black Association*, 2017).



Figura 9. Negro de fumo representado com diferentes tamanhos de partículas (retirado de Gerhard (Geert) J. Bleys, 2017)

3.4 Monitorização em tempo real

Grande parte das infraestruturas são constituídas por betão, no entanto a sua fiabilidade é relativamente baixa devido à sua degradação, consequentemente a segurança das estruturas de betão é um problema que se deve ter em conta em todos os campos da engenharia civil (Han & Ou, 2007).

O comportamento autossensível do betão é uma solução ideal para resolver este tipo de problemas, devido à sua capacidade de monitorização da tensão, da abertura de fendas e de outros danos causados na infraestruturas (L. Shi, Lu, & Bai, 2017).

Assim a monitorização da saúde estrutural realiza um avanço na engenharia significativo através da integração de variáveis físicas elétricas, magnéticas, acústicas e térmicas. Uma estrutura deve apresentar exigências de segurança, durabilidade, manutenção e sustentabilidade para uma operação a longo prazo. Durante o seu serviço a longo prazo, a estrutura pode reduzir o seu desempenho, ser danificada ou mesmo colapsar quando sujeita a desastres naturais, como terremotos ou ventos fortes. Assim a implementação desta tecnologia (monitorização da saúde estrutural da infraestruturas) permite avaliar a segurança e durabilidade de uma estrutura durante a sua vida útil, de forma a garantir a sua sustentabilidade e manutenção. O sistema de monitorização é constituído por sensores, sistemas de aquisição e transmissão de dados para uma melhor monitorização e diagnóstico (Li & Ou, 2011).

Os sensores são um componente fundamental nos sistemas de monitorização da saúde estrutural e permitem monitorizar os danos estruturais causados por diversos fatores, tais como, a carga por fadiga, a corrosão ambiental e desastres naturais (Xiao, Li, & Ou, 2010).

Os sensores de tensão são relevantes no controlo de vibração estrutural, monitorização de tráfego e pesagem. Esta pesagem diz respeito à pesagem de veículos que podem ou não estar em movimento, à pesagem de todas as pessoas em cada divisão num edifício com o objetivo de monitorizar a ocupação de cada divisão e o uso dessa informação de forma a controlar a iluminação, ventilação, ar condicionado e aquecimento, obtendo assim uma melhoria na economia de energia do edifício. Pode também ser efetuada a deteção de pessoas dentro ou fora do edifício de forma a melhorar a sua segurança (Chung, 2002).

A monitorização de tráfego é um dos focos deste trabalho. Para ser possível um controlo e monitorização em tempo real, é necessário a utilização de sensores de deformação, estes podem ser óticos, elétricos, magnéticos ou acústicos. Estes sensores vão ser convencionalmente incorporados na via de circulação, permitindo assim uma monitorização em tempo real (Z. Q. Shi & Chung, 1999).

Entre as tecnologias de monitorização e deteção de tráfego, os detetores de ciclos embutidos foram os mais utilizados, no entanto, estes apresentam várias limitações, como a necessidade de corte da via para a sua instalação, o encerramento das vias para manutenção, a baixa taxa de sobrevivência da vida útil da via de circulação, devido a problemas de compatibilidade. Surgiram então outras tecnologias de monitorização, como radares de micro-ondas, sensores de infravermelhos, *lasers* e processadores de imagens de vídeo, no entanto, estes sensores apresentam desvantagens devido ao seu elevado custo e mau desempenho quando sujeitos a condições climáticas severas (O, J, & B, 2017). Uma alternativa promissora pode ser a utilização de sensores de deformação à base de cimento piezoresistivo em locais próprios do pavimento. Isto permitiria não só a monitorização da densidade e velocidade do fluxo de veículos, mas também seria possível a pesagem em movimento de forma a categorizar o tipo de tráfego em tempo real (Monteiro *et al.*, 2017).

Descobriu-se que o negro de fumo tem uma capacidade de autodeteção de tensão, sendo então um possível candidato a ser utilizado nos sensores de deformação à base de cimento piezoresistivo para a monitorização de infraestruturas a longo prazo (Xiao *et al.*, 2010).

Recentemente surgiu uma tecnologia que envolve o próprio uso do betão como sensor, de forma a que não seja necessário embutir ou conectar nenhum sensor na via de circulação. Como o material estrutural (betão) é também um sensor, toda a estrutura vai ser monitorizada, sendo este durável e barato. A pesagem de veículos, como camiões, é necessária de forma a evitar danos nas vias devido a veículos com excesso de peso. Atualmente a pesagem de veículos é realizada em estações próprias de pesagem fora da via enquanto o veículo se encontra parado. No entanto, uma solução mais conveniente e eficaz era efetuar a pesagem de veículos em movimento, desta forma o tráfego não era afetado e consequentemente existiria uma poupança significativa no tempo utilizado na pesagem dos veículos parados. Se toda a via de circulação fosse capaz de implementar este método, a monitorização era contínua e portanto mais completa que o método atual (Z. Q. Shi & Chung, 1999).

4. Caracterização e desenvolvimento dos sensores de betão com adição de negro de fumo

O trabalho realizado em laboratório foi crucial para o desenvolvimento do sensor de betão com a adição de negro de fumo (NF), sendo que, todo o trabalho experimental foi realizado no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro que reúne todas as condições e equipamentos necessários de forma a obter o melhor produto final possível. Neste capítulo são apresentados todos os procedimentos e materiais utilizados para a elaboração dos sensores.

Inicialmente foram estudados quatro tipos diferentes de misturas, sendo estas compostas por cimento *Portland* CEM II, areia fina (< 1 mm), policarboxilato (Sika ViscoCrete 3002 HE), também conhecido por super plastificante de alto desempenho (SP) e negro de fumo N330 das quais as propriedades se encontram apresentadas nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1. Propriedades do negro de fumo

| <i>Densidade</i> [g/cm ³] | <i>Densidade aparente</i> [g/cm ³] | <i>Área de superfície</i> [m ² /g] |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1.7 – 1.9 | 0.368 | 78 |

Quadro 2. Propriedades do super plastificante

| <i>Massa volúmica</i> [kg/dm ³] | <i>pH</i> [+23 ± 2°C] | <i>Teor de sólidos</i> [%] | <i>Teor em cloretos</i> [%] |
|------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1.06 ± 0.02 | 4.3 ± 1.0 | 26.5 ± 1.3 | < 0.1 |

As relações utilizadas em peso ou volume aparente, para a realização de cada mistura estão representadas no Quadro 3 e as proporções das misturas realizadas estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 3. Relações utilizadas para o fabrico das quatro misturas

| <i>Mistura</i> | <i>Água/Cimento</i> [Peso] | <i>Agregado/Cimento</i> [Volume aparente] | <i>NF/Cimento</i> [Peso] | <i>SP/Cimento</i> [Peso] |
|----------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 4SP | 0.6 | 2 | 0.065 | 0.04 |
| 2SP | 0.5 | 2 | 0.065 | 0.02 |
| 3SP | 0.5 | 2 | 0.065 | 0.03 |
| 3SPLW | 0.55 | 2 | 0.065 | 0.03 |

Quadro 4. Proporções dos materiais utilizados para o fabrico de cada amostra (kg/m³)

| <i>Mistura</i> | <i>Cimento</i> | <i>Água</i> | <i>Agregados</i> | <i>NF</i> | <i>SP</i> |
|----------------|----------------|-------------|------------------|-----------|-----------|
| 4SP | 528.5 | 317.1 | 1225.3 | 34.4 | 21.1 |
| 2SP | 563.9 | 282.0 | 1307.5 | 36.7 | 11.3 |
| 3SP | 561.0 | 280.5 | 1300.6 | 36.5 | 16.8 |
| 3SPLW | 545.7 | 300.1 | 1265.1 | 35.5 | 16.4 |

Cada mistura foi desenvolvida utilizando o mesmo procedimento. Em primeiro lugar adicionou-se a água e o negro de fumo com metade do super plastificante num recipiente de vidro, misturando tudo com uma vareta até obter uma mistura homogénea, seguidamente realizou-se a sonicação da mistura obtida durante aproximadamente 45 minutos, ou até verificar que o negro de fumo foi totalmente dissolvido. Como o negro de fumo é uma substância com partículas muito finas é relativamente difícil esta dispersar-se na água, para facilitar este processo é realizada a sonicação que pode ser aplicada através de um sonicador, que consiste num recipiente com água onde se propagam as ondas sonoras, a energia gerada por essas ondas faz com que as partículas do negro de fumo se dispersem mais facilmente, como observado na **Figura 10**.



Figura 10. Sonicação da mistura

Posteriormente, foi adicionado o cimento à suspensão obtida sendo esta misturada numa misturadora para argamassas durante aproximadamente cinco minutos até obter uma mistura homogênea. Em seguida adicionou-se a areia e a metade do super plastificante que ainda não tinha sido utilizado misturando durante mais cinco minutos (**Figura 11**).



Figura 11. Mistura final obtida

Cada mistura foi então retirada da misturadora para argamassas sendo de seguida realizado de acordo com a norma EN 1015-3 o ensaio de espalhamento ou “*slump test*”, de forma a determinar a consistência da argamassa fresca. Este ensaio consiste em colocar a mistura num molde humedecido, sendo desta forma mais fácil de retirar depois de compactado, em cima de uma mesa de espalhamento, em seguida depois de retirar o molde, rodar a manivela 15 vezes durante aproximadamente 15 segundos, ou seja, em média efetuar uma pancada por segundo. Nas **Figuras 12 e 13** é possível observar a amostra antes e depois do ensaio de espalhamento.



Figura 12. Mistura 4SP intacta na mesa de espalhamento



Figura 13. Mistura 4SP depois de realizado o ensaio de espalhamento do betão

A **Figura 14** representa os diâmetros de cada mistura obtidos depois de realizado o ensaio de espalhamento.

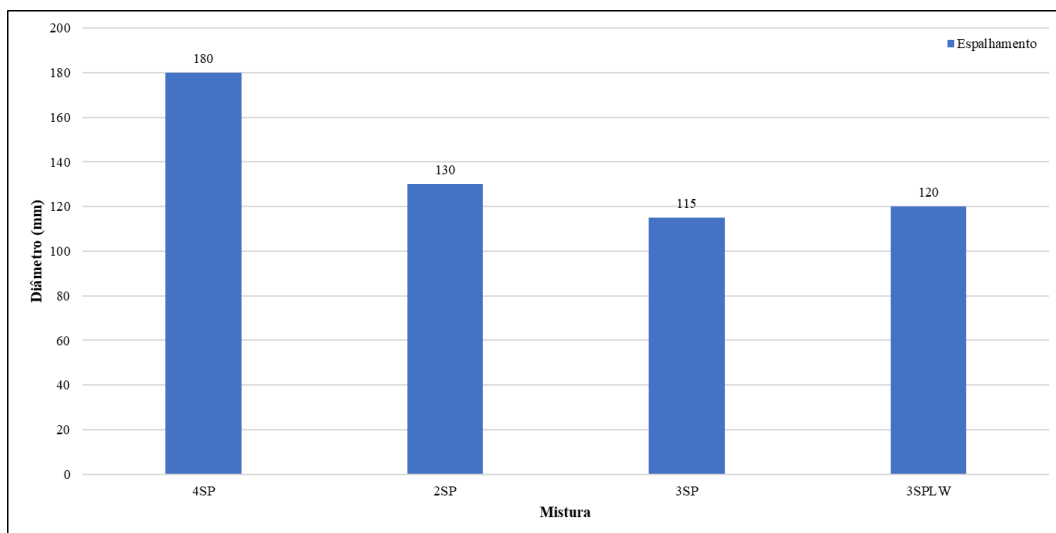


Figura 14. Diâmetros de cada mistura obtidos através do ensaio de espalhamento

Foram fabricadas duas amostras para cada mistura, sendo estas colocadas em moldes com $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ que foram previamente lubrificadas com o intuito de facilitar a remoção das amostras depois de secas, em seguida foram vibradas durante 45 segundos numa mesa

vibratória, de forma a eliminar o máximo de bolhas de ar existentes. Com um tempo de cura de 48 horas as amostras já têm resistência suficiente para serem descofradas, sendo de seguida colocadas na câmara climática com temperatura de 20 °C e 95% de humidade relativa durante 14 dias. Com o tempo de cura de 14 dias foram realizados ensaios mecânicos de acordo com a norma EN1015-11 com auxílio de uma prensa *Shimadzu press AG-IC* com carga máxima de 100 kN para verificar a resistência de cada amostra quando sujeita à flexão e à compressão. Os ensaios à flexão e compressão foram realizados a velocidades diferentes, 50 N/s e 500 N/s respetivamente. Na **Figura 15** é possível visualizar a tensão máxima de rotura de cada amostra.

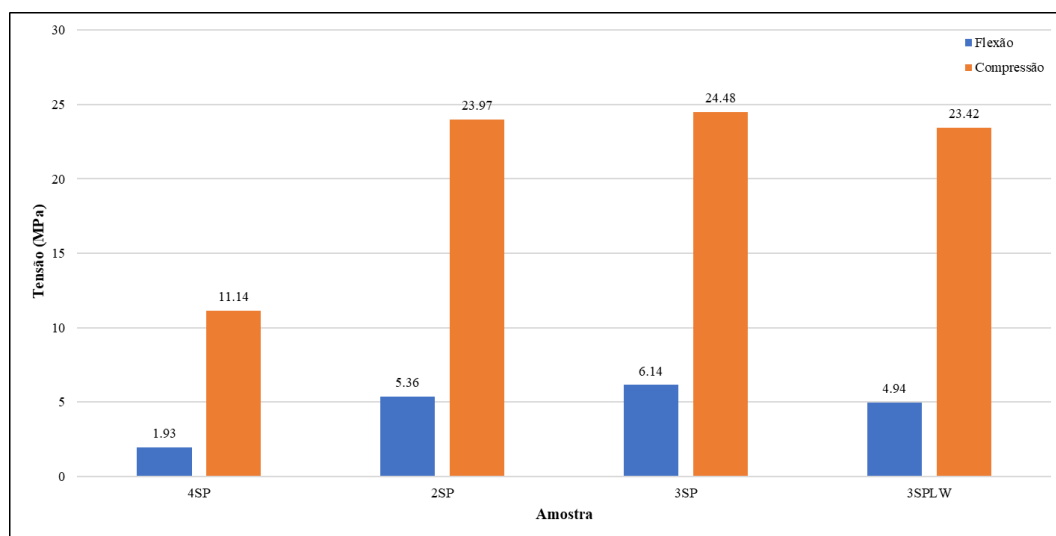


Figura 15. Resistência à flexão e compressão de cada amostra

De notar que o betão atinge a máxima resistência aos 28 dias, no entanto como este estudo inicial estava apenas direcionado para a escolha da melhor mistura a ser utilizada no fabrico dos sensores finais, estes ensaios foram realizados aos 14 dias de cura e não aos 28 dias, de forma a acelerar o processo de escolha.

A mistura escolhida para o fabrico dos sensores de betão finais foi a mistura 3SPLW, apesar das misturas 2SP e 3SP apresentarem valores ligeiramente melhores de resistência à flexão e compressão em relação à mistura 3SPLW. Um dos principais fatores que levou à escolha desta mistura foi a trabalhabilidade que esta apresenta, uma vez que é necessário colocar redes galvanizadas e termopares nos sensores, portanto a trabalhabilidade apresenta um ponto crucial no desenvolvimento dos mesmos.

Pode-se então dar início ao fabrico dos sensores de betão com a adição do negro de fumo, mas para tal é necessário verificar se a mistura escolhida origina provetes que apresentam

um comportamento piezoresistivo. Procedeu-se então a um novo fabrico da mistura 3SPLW, seguindo o processo descrito inicialmente, com o objetivo de produzir apenas um provete com dimensões $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Seguidamente e depois da amostra vibrada foram colocadas quatro redes galvanizadas $4 \times 3 \text{ cm}$ com uma abertura de aproximadamente 5 mm espaçadas de 2 cm da extremidade do provete e 4 cm entre elas, estas redes vão ter a função de elétrodos nos ensaios de piezoresistividade.

Já descofrado, o provete permaneceu 28 dias na câmara climática com temperatura constante de 20°C e 95% de humidade relativa. Passado os 28 dias o mesmo provete foi colocado numa estufa a uma temperatura de 60°C durante 48 horas. Desta forma, foi possível eliminar quase na totalidade a água existente no provete de forma a não afetar as leituras nos ensaios de piezoresistividade. A **Figura 16** apresenta o provete final obtido com a mistura escolhida.



Figura 16. Provete final obtido com 6.5% de NF

Depois de seco, as superfícies laterais do provete foram limpas e com a aplicação de uma cola epóxi (Araldite) foram aplicados dois extensómetros da marca LITEK do tipo YBQ120AA com 20 mm de comprimento, resistência de $119.5 \pm 0.4 \Omega$ e um GF de $2.07 \pm 1.5\%$, um em cada lado do provete ao longo do eixo longitudinal entre os elétrodos do meio como pode ser observado na **Figura 17 e 18**.

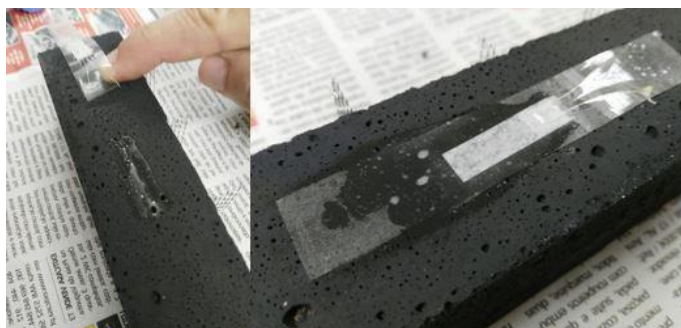


Figura 17. Aplicação dos extensómetros

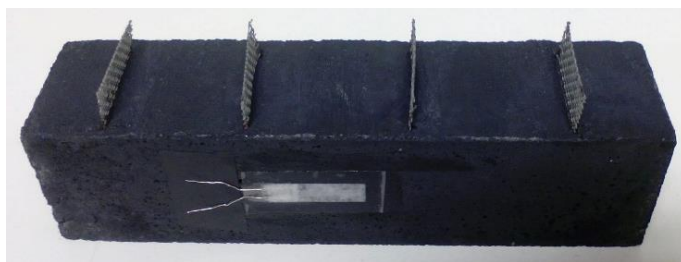


Figura 18. Provete final depois da aplicação dos extensómetros

Depois de verificar que o provete apresenta um comportamento piezoresistivo, onde pode ser observado com mais detalhe no capítulo 7, foram então desenvolvidos os sensores finais. De forma a otimizar o estudo realizado foram realizadas três misturas 3SPLW contendo diferentes percentagens de NF (0%, 4.5% e 6.5%).

As relações utilizadas em peso ou volume aparente, para cada mistura são representadas no Quadro 5 e as proporções no Quadro 6.

Quadro 5. Relações utilizadas para o fabrico das misturas com diferentes percentagens de NF

| <i>NF</i> [%] | <i>Água/Cimento</i> [Peso] | <i>Agregado/Cimento</i> [Volume aparente] | <i>NF/Cimento</i> [Peso] | <i>SP/Cimento</i> [Peso] |
|------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0.55 | 2 | 0 | 0 |
| 4.5 | 0.55 | 2 | 0.045 | 0.03 |
| 6.5 | 0.55 | 2 | 0.065 | 0.03 |

Quadro 6. Proporções dos materiais utilizados para o fabrico das misturas com diferentes percentagens de NF (kg/m³)

| <i>Mistura</i> | <i>Cimento</i> | <i>Água</i> | <i>Agregados</i> | <i>NF</i> | <i>SP</i> |
|----------------|----------------|-------------|------------------|-----------|-----------|
| 0% | 565.5 | 311.0 | 1311.2 | 0 | 0 |
| 4.5% | 549.0 | 301.9 | 1272.8 | 24.7 | 16.5 |
| 6.5% | 545.7 | 300.1 | 1265.1 | 35.5 | 16.4 |

Uma nota importante foi o facto que durante a realização da mistura com 4.5% de NF, o SP não foi utilizado na totalidade, apenas metade do que era suposto foi colocado na fase da sonicação. Isto porque como o NF é uma substância que adsorve muita água, ao utilizar

menos quantidade de NF a mistura vai ficar mais líquida não sendo necessário utilizar a restante quantidade do SP.

Os sensores de betão finais foram produzidos em moldes com $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, o método de fabrico da mistura é exatamente igual ao utilizado nos provetes anteriores, no entanto a sua composição interna é diferente. Duas redes galvanizadas $9 \times 9 \text{ cm}^2$ com uma abertura de aproximadamente 0.5 cm e com um espaçamento de 4 cm entre elas foram colocadas no centro do molde, sendo estas previamente ligadas a um cabo elétrico com 0.5 mm^2 de secção através de uma solda a estanho. De notar que as redes galvanizadas foram colocadas com 9 cm de lado e não 10 cm deixando assim 1 cm de recobrimento entre o molde e a rede de forma a evitar a fissuração ou até mesmo a quebra do provete na zona da rede. Por fim foi aplicado entre as redes um sensor de temperatura, termopar tipo K com capacidade para registar temperaturas entre os $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ e os $250 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.75\%$, procurando sempre que este fique o mais centrado possível no interior do molde. O desenvolvimento da componente interna de cada provete foi idêntico para cada tipo de mistura. A montagem dos fios elétricos, redes galvanizadas e termopares tipo K pode ser observada na **Figura 19 e 20**.

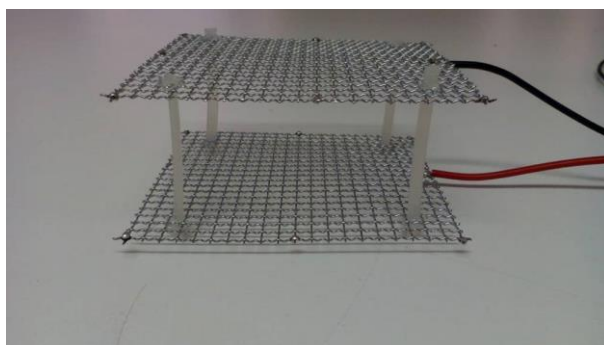


Figura 19. Redes galvanizadas espaçadas de 4 cm dos sensores $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$

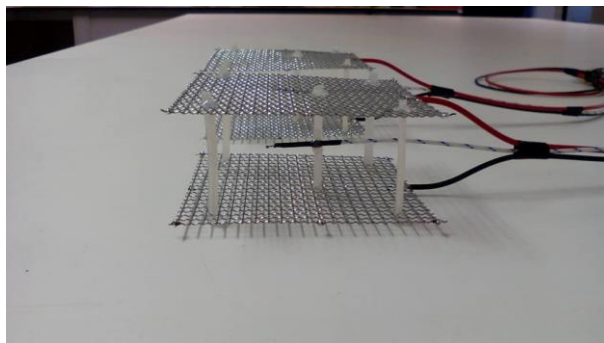


Figura 20. Aplicação do termopar tipo K

Cada conjunto de redes foi inserida e centrada nos moldes, sendo estes previamente lubrificados, em seguida foi colocada a mistura, tendo a atenção de manter ao máximo o posicionamento central do termopar. Por fim cada amostra foi vibrada durante 45 segundos na mesa vibratório com o máximo de cuidado para não descentrar os elétrodos. As **Figuras 21 e 22** representam os moldes antes e depois da colocação da mistura, que neste caso específico foi a de 6.5% de NF.



Figura 21. Disposição da componente interna no molde de 10x10x10 cm³

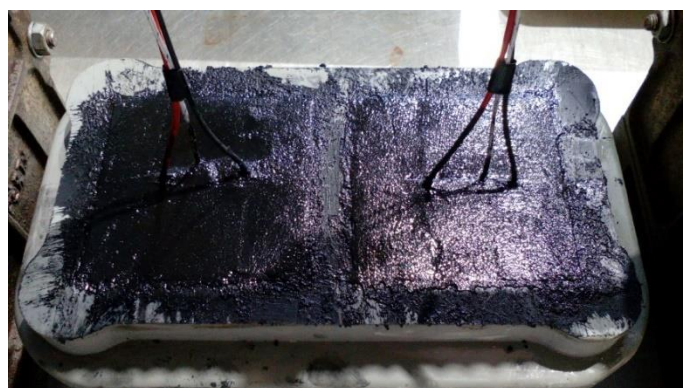


Figura 22. Moldes de 10x10x10 cm³ depois da colocação da mistura com 6.5% de NF

Para a realização dos ensaios de piezoresistividade foi desenvolvido um sensor com 0% de NF, outro com 4.5% e três com 6.5%, já para os ensaios mecânicos foram desenvolvidos dois provetes de cada percentagem sem a aplicação dos componentes internos. Uma vez descofrados, todos provetes permaneceram 28 dias na câmara climática com temperatura constante de 20 °C e 95% de humidade relativa. A **Figura 23** mostra os três tipos de sensores desenvolvidos com 28 dias de cura.



Figura 23. Sensores com diferentes percentagens de NF com 28 dias de cura

Os provetes desenvolvidos sem a aplicação dos componentes internos foram apenas utilizados para verificar a resistência à compressão aos 28 dias de cada mistura, mas como a secção dos provetes foi alterada para 10x10x10 cm³, a prensa *Shimadzu press AG-IC* com carga máxima de 100 kN anteriormente utilizada para os ensaios de flexão e compressão dos provetes com 4x4x16 cm³ já não tem capacidade para realizar este ensaio. A tensão de um material pode ser expressa pela **Equação 10** cuja unidade padrão é o MPa ou N/mm², sendo (*A*) a área da secção em mm² e (*F*) a força aplicada em N, quanto maior a área mais força se tem que aplicar para obter a mesma tensão.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$

Para ultrapassar este problema, os ensaios de compressão foram realizados com auxílio da prensa *Form Test 3000* com carga máxima 3000 kN a uma velocidade de 0.5 MPa/s. Os resultados da tensão máxima de rotura à compressão de cada amostra com 28 dias de cura estão apresentados na **Figura 24**.

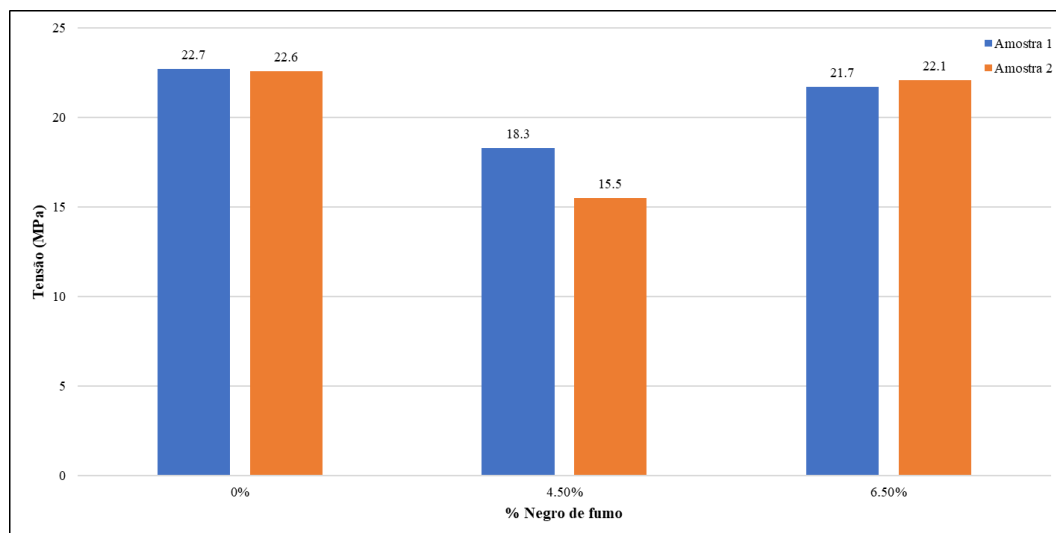


Figura 24. Tensão máxima de rotura à compressão das amostras com 0%, 4.5% e 6.5% de NF

Ao observar a **Figura 24** é possível verificar um decréscimo acentuado da resistência à compressão da amostra 2 com 4.5% de NF, isto deve-se ao facto de esta conter uma imperfeição de dimensões razoáveis num dos cantos.

As superfícies dos sensores finais foram limpas, e com a aplicação de uma cola epóxi (*Araldite*) foram colocados dois extensómetros da marca TML do tipo PFL-20-11 com 20 mm de comprimento, resistência de $120 \pm 0.3 \Omega$ e um GF de $2.12 \pm 1\%$, um em cada lado do provete na posição transversal em relação às redes galvanizadas, é possível visualizar a disposição dos extensómetros na **Figura 25**.

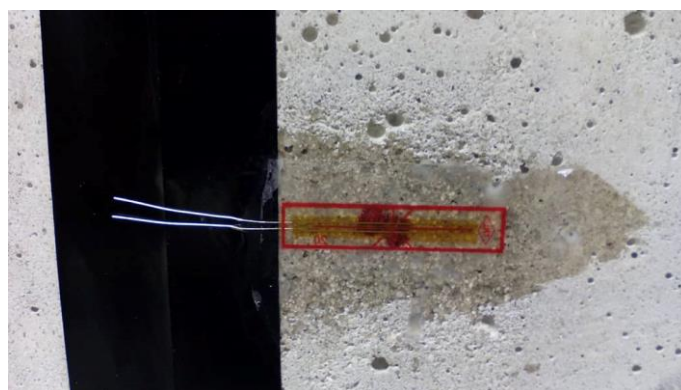


Figura 25. Aplicação do extensómetro no sensor com 0% de NF

Depois de colocados os extensómetros procedeu-se à secagem dos sensores. Inicialmente cada sensor foi pesado registando posteriormente cada valor, em seguida foram colocados na estufa a 60°C durante 24 horas sendo pesados novamente fazendo sempre o registo dos valores obtidos, este ciclo foi realizado durante 7 dias. Os valores do peso dos sensores ao longo do tempo está representado na **Figura 26**.

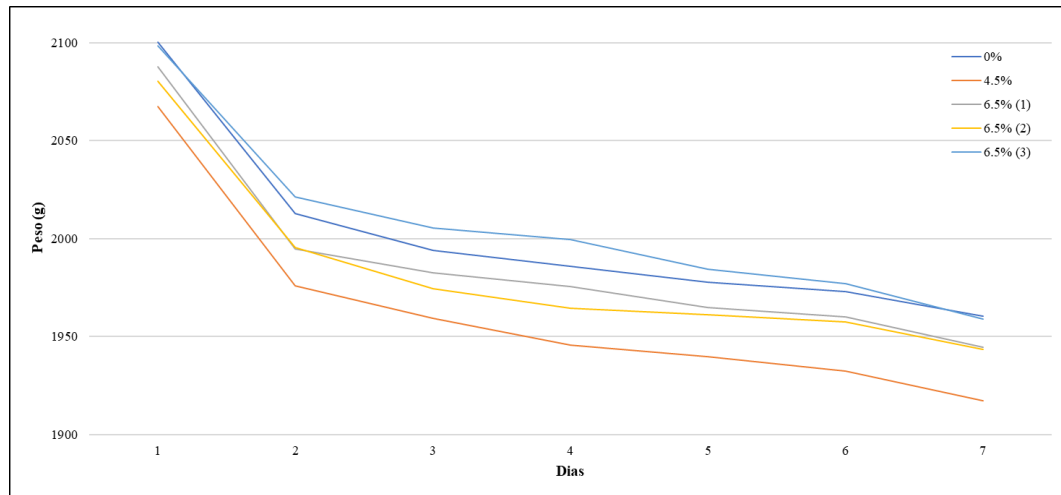


Figura 26. Controlo do peso dos sensores ao longo de 7 dias na estufa a 60 °C

A humidade no sensor é um ponto crucial a ter em conta quando à realização dos ensaios de piezoresistividade, pois a água presente no sensor afeta as leituras dos ensaios. Só depois de secos é que os sensores podem ser submetidos aos ensaios de piezoresistividade.

5. Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados

A monitorização da resistividade de cada sensor, só foi possível através da utilização de um sistema de aquisição de dados. Neste capítulo são descritos todos os procedimentos e fórmulas utilizadas para o desenvolvimento deste sistema.

O sistema de monitorização é constituído por cinco componentes principais. Uma fonte de corrente *Protek DC Power Supply*, um *Data Taker DT80*, uma prensa *Shimadzu press AG-IC*, um computador munido de software adequado a receber as informações obtidas pelo *Data Taker* e o sensor piezoresistivo. A **Figura 27** representa a configuração deste sistema.

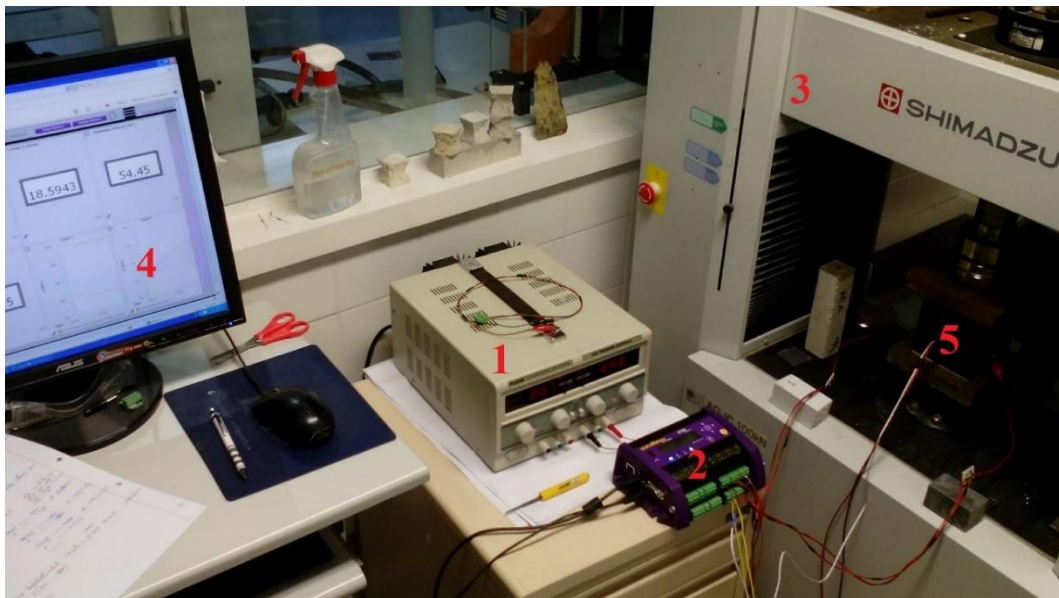


Figura 27. Componentes utilizados para a monitorização dos sensores. Onde 1- *DC Power Supply*, 2- *Data Taker DT80*, 3- Prensa *Shimadzu press AG-IC*, 4- Computador e 5- Sensor piezoresistivo

O *Data Taker DT80* que pode ser observado com mais detalhe na **Figura 28** foi programado de forma a monitorizar e registar vários componentes durante os ensaios de piezoresistividade, tais como: a deformação axial de cada extensómetro ($\mu\epsilon$), a resistência elétrica (Ω), a resistividade ($\Omega.m$) e a temperatura ($^{\circ}C$).



Figura 28. Data Taker DT80

Como descrito anteriormente, foram aplicados dois extensómetros em cada tipo de sensor com o intuito de determinar a deformação que ocorre quando aplicada uma força de compressão, no entanto é necessário compreender como é que se determina a deformação através do extensómetro.

Uma força de compressão ou tração externa aplicada a um material com um comportamento elástico origina a deformação do mesmo, podendo esta ser negativa ou positiva respetivamente, pode ser descrita como a mudança fracionária de comprimento e é determinada a partir da **Equação 11** em que L representa o comprimento original do material e ΔL representa a mudança de comprimento originada pela aplicação da força (Gauge, 1998; E-c, 2017).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (11)$$

Ao colocar o $\Delta L/L$ em evidência na **Equação 9** é possível representar a deformação em função do GF como se pode observar na **Equação 12**.

$$\varepsilon = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{GF} \quad (12)$$

Na **Figura 29** é representado esquematicamente a deformação de um material quando aplicada uma força de tração.

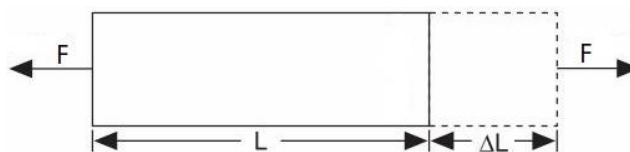


Figura 29. Deformação (adaptado de Gauge, 1998)

Apesar de ser adimensional a deformação é muitas vezes expressa em micro deformação $\mu\epsilon$ ou $\epsilon \times 10^{-6}$. Existem vários métodos para medir a deformação, embora o mais utilizado é a aplicação de um extensômetro metálico diretamente na superfície do provete, um dispositivo cuja resistência varia proporcionalmente com a força aplicada. É de extrema importância que o extensômetro seja corretamente aplicado, de forma a garantir que a deformação do provete seja transferida para a base do extensômetro e consequentemente para o extensômetro em si (Gauge, 1998).

Ao ligar um metal fino através de um isolante elétrico fino, o metal vai deformar dependendo da deformação do provete, alterando também a sua resistência elétrica. O extensômetro é construído formando um padrão em forma de rede que é constituído por um fio de resistência elétrica ou uma folha de resistência metálica gravada fotograficamente numa base isolante, anexando por fim cabos de medição (E-c, 2017).

Na **Figura 30** é possível observar uma representação esquemática de um extensômetro convencional.

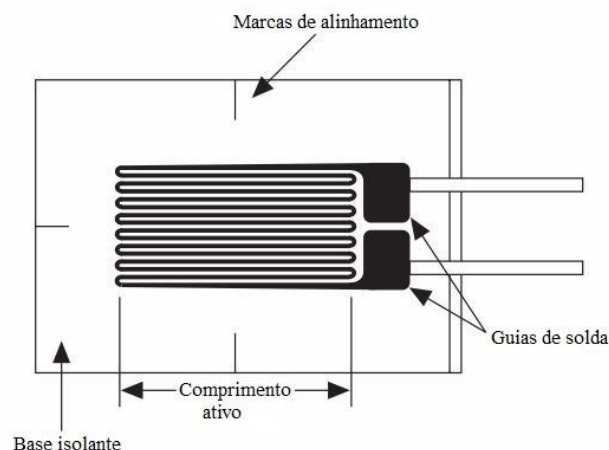


Figura 30. Representação esquemática de um extensômetro (adaptado de Gauge, 1998)

Um parâmetro fundamental do extensômetro é a sua sensibilidade à deformação, expressa quantitativamente pelo GF (*gauge factor*) que pode ser obtido pela Equação 9 referida no capítulo 3. Normalmente os extensômetros metálicos possuem um GF em torno de 2. Na prática, as medidas da deformação raramente envolvem quantidades superiores a $\epsilon \times 10^{-3}$, portanto para medir a deformação é necessária a medição precisa de variações muito pequenas na resistência. Para medir essas pequenas mudanças na resistência, os extensômetros são quase sempre usados numa ponte *Wheatstone* com uma fonte de tensão

ou corrente. A ponte *Wheatstone* convencional ilustrada na **Figura 31** é constituída por quatro resistências e uma diferença de potencial de entrada V_{EX} (Gauge, 1998).

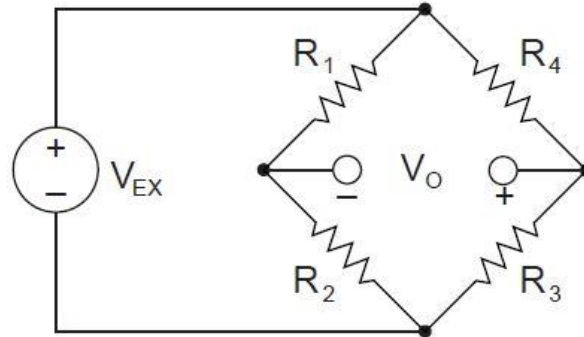


Figura 31. Ponte *Wheatstone* convencional (retirado de Gauge, 1998)

A diferença de potencial de saída (V_0) pode ser obtida através da **Equação 13**.

$$V_0 = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \times V_{EX} \quad (13)$$

Ao observar a **Equação 13** é possível compreender que se todas as resistências forem iguais, a diferença de potencial de saída V_0 é nula. Isto significa que a ponte *Wheatstone* se encontra em equilíbrio. Qualquer variação de resistência que ocorra irá alterar a diferença de potencial de saída para um valor diferente de zero. Então se a resistência R_4 for substituída por um extensómetro R_G de resistência igual à resistência R_3 qualquer variação na resistência do extensómetro quando aplicada uma força irá resultar na perda de equilíbrio da ponte *Wheatstone* gerando assim um valor de voltagem diferente de zero. Este tipo de circuito é denominado por *Quarter-Bridge Circuit* como representado na **Figura 32**. Se a variação da resistência for expressa por ΔR sendo obtida pelo produto da resistência do extensómetro com o GF e a deformação, a *Quarter-Bridge Circuit* pode ser definida pela **Equação 14** (Gauge, 1998).

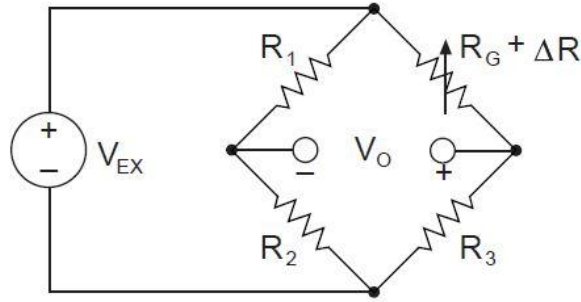


Figura 32. *Quarter-Bridge Circuit* (retirado de Gauge, 1998)

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{GF \times \varepsilon}{4} \left(\frac{1}{1 + GF \times \frac{\varepsilon}{2}} \right) \quad (14)$$

De forma a recriar a *Quarter-Bridge Circuit* foi utilizada uma placa de circuito branca, três resistências de $120 \, \Omega$ de alta precisão e fio elétrico de cor preta e vermelha. Utilizando uma soldagem de estanho foram ligadas as três resistências à placa de circuito fazendo a ligação de cada fio entre cada resistência, por fim foram colocados dois fios nas duas aberturas que restavam, que posteriormente vão fazer a ligação ao extensômetro já aplicado no sensor. A **Figura 33** mostra a configuração final do *Quarter-Bridge Circuit*.

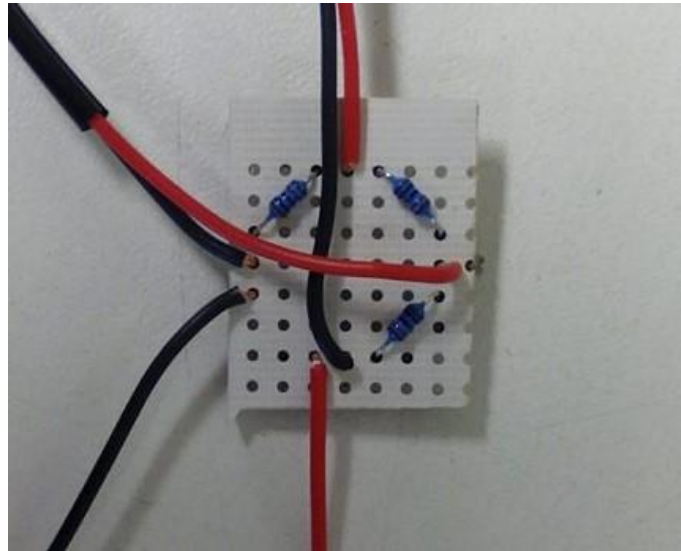


Figura 33. Configuração final do *Quarter-Bridge Circuit*

Para realizar a monitorização da deformação de cada sensor foram elaboradas duas *Quarter-Bridge Circuit*, o que permitiu obter informação mais pormenorizada sobre o comportamento do sensor quando aplicada a força.

Por fim, de forma a facilitar a leitura dos dados dos ensaios e consequentemente a análise de resultados, desenvolveu-se um sistema que, ao programar o software da prensa *Shimadzu press AG-IC* e ao realizar a ligação do canal da voltagem de saída da prensa a um canal do *Data Taker DT80* foi possível registar o valor da voltagem à medida que se aplica a força de compressão no sensor, sendo assim possível determinar a força a cada momento do ensaio, uma vez que o *Data Taker* não regista esse tipo de dados. No entanto é necessário ter em conta que a relação da força aplicada e a voltagem registada é sempre diferente, sendo necessário alterar o limite máximo de força da prensa em cada tipo de ensaio. Por exemplo, ao realizar um ensaio com o máximo de 80 kN é necessário colocar o limite máximo de 100 kN na prensa, o que vai assumir que 5 V, que é a voltagem constante que a prensa regista, equivalem a uma força de 100 kN, ou seja, para determinar a força aplicada em cada momento do ensaio usando a monitorização da voltagem realizada pelo *Data Taker* basta aplicar a **Equação 15**.

$$F = V \times \frac{x}{5} \quad (15)$$

Onde x representa o limite da força máximo aplicado na prensa em *kN*, e V a voltagem registada pelo *Data Taker* em *Volts*.

6. Ensaaios laboratoriais

Neste subcapítulo são descritos em detalhe cada ensaio efetuado bem como todos os procedimentos necessários à sua realização.

Um fator muito importante a ter em conta durante a realização de todos os ensaios foi o isolamento do provete e dos sensores. Uma vez que a prensa é metálica a corrente elétrica aplicada no provete ou no sensor é facilmente dissipada para a prensa, então para suprimir a dissipação de corrente elétrica foi aplicada uma placa acrílica de aproximadamente 1 cm de espessura entre a prensa e as extremidades do provete e do sensor. A **Figura 34** apresenta o isolamento de um sensor com 6.5% de NF.

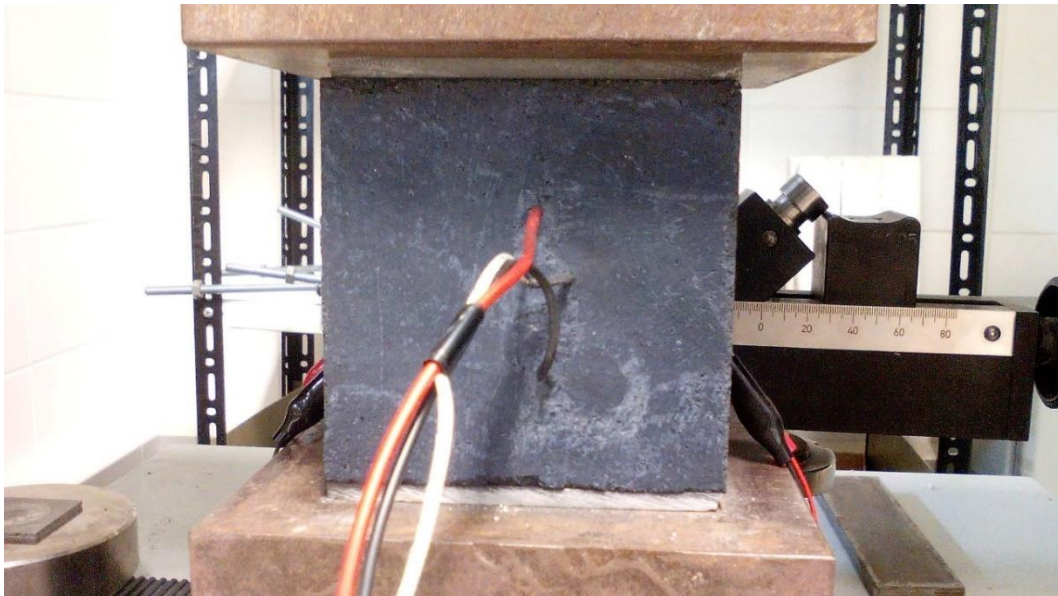


Figura 34. Isolamento de um sensor com 6.5% de NF

Foi também isolado a zona inferior dos extensómetros com a aplicação de fita isoladora, de forma a evitar o contacto entre os fios do extensómetro e o sensor quando é realizada a ligação à *Quarter-Bridge Circuit*, impedindo assim que a corrente elétrica se disperse para o sensor. É possível observar o isolamento das ligações dos extensómetros na **Figura 35**.



Figura 35. Isolamento da zona inferior do extensómetro

Primeiramente foi estudado o provete $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de forma a perceber se a mistura realizada para os sensores tinha ou não um comportamento piezoresistivo. Começou-se por aplicar uma diferença de potencial constante de 12 V aos eléktodos externos, enquanto que nos eléktodos internos foi registada a corrente eléctrica com a aplicação de uma resistência de 120Ω . Em seguida a prensa foi programada de forma a aplicar uma força de 2 kN ao eixo maior do provete durante 120 segundos, tempo esse necessário para a resistividade do provete estabilizar, seguidamente o provete foi sujeito a uma carga cíclica de 15 kN durante 10 ciclos.

Posteriormente foi realizado o controlo de humidade e resistividade aos sensores depois de secos. Este estudo dividiu-se em duas fases distintas. Numa primeira fase foi determinado o peso de cada sensor e em seguida aplicada uma diferença de potencial de 3, 5 e 6 V registando o valor da resistividade em cada voltagem. De notar que os valores da voltagem aplicados foram adotados de forma a perceber como é que cada sensor se comporta quando sujeito a uma pequena variação da diferença de potencial. Com o intuito de evitar um registo precoce da resistividade, a diferença de potencial foi aplicada durante 5 minutos em cada sensor, garantindo assim a estabilização do valor da resistividade. Após registar o valor de cada sensor, estes repousaram a uma temperatura ambiente durante aproximadamente 24 horas, este processo foi realizado ao longo de quatro dias. Nas **Figuras 36 a 40** apresentam-se os resultados obtidos para cada sensor.

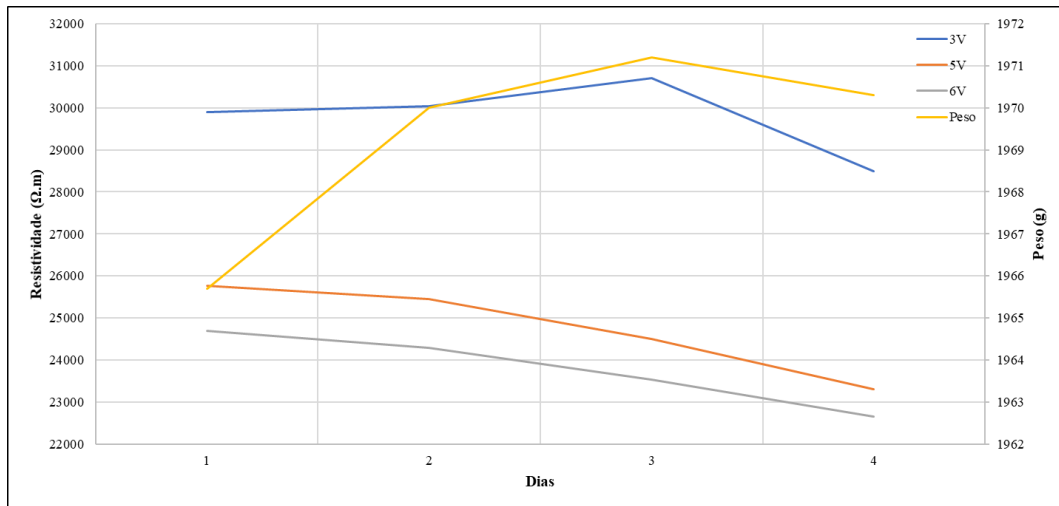


Figura 36. Comportamento do sensor com 0% de NF à temperatura ambiente

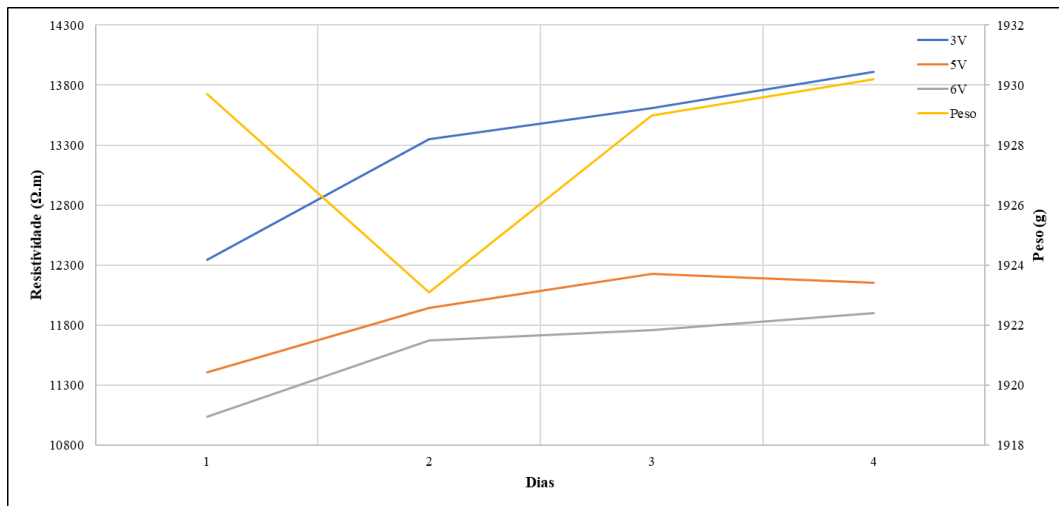


Figura 37. Comportamento do sensor com 4.5% de NF à temperatura ambiente

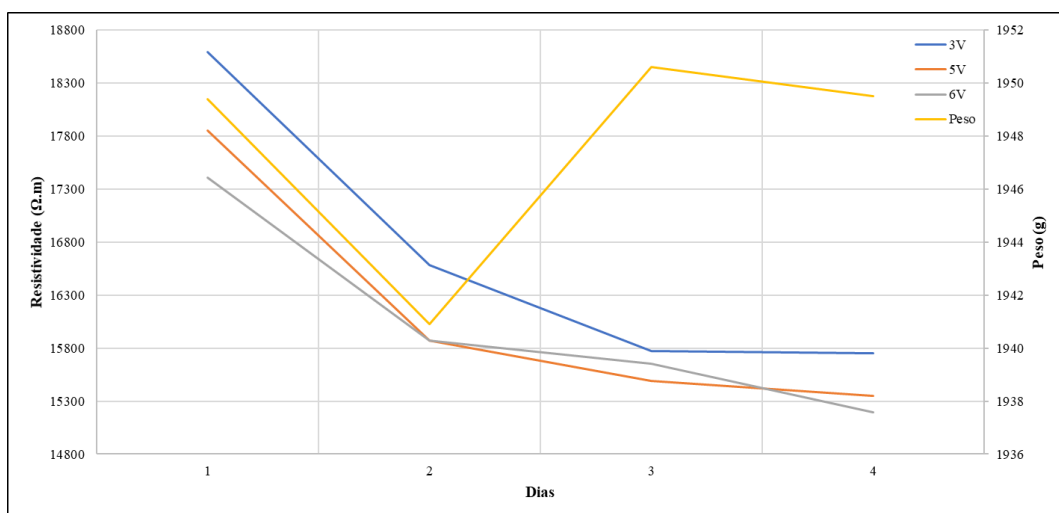


Figura 38. Comportamento da amostra 1 do sensor com 6.5% de NF à temperatura ambiente

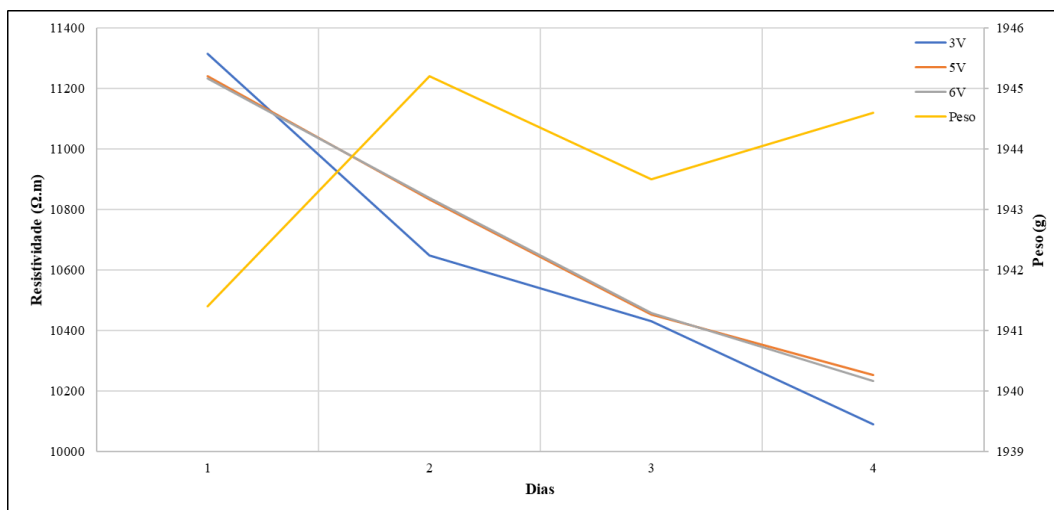


Figura 39. Comportamento da amostra 2 do sensor com 6.5% de NF à temperatura ambiente

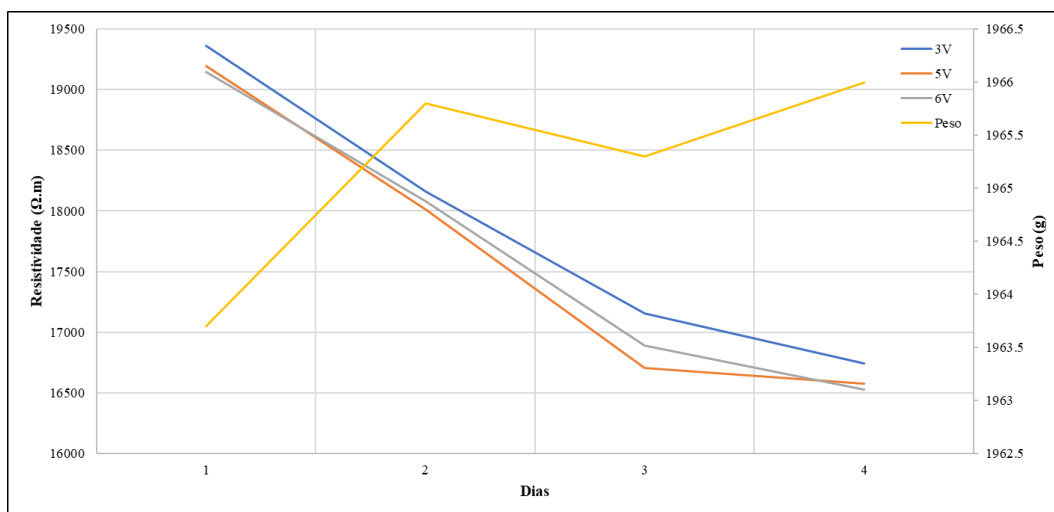


Figura 40. Comportamento da amostra 3 do sensor com 6.5% de NF à temperatura ambiente

Antes de efetuar a análise dos ensaios do controlo da resistividade posteriormente à secagem dos sensores, é necessário compreender o valor inconstante do peso que cada sensor apresenta ao longo dos dias. Este valor é explicado pela inexistência de controlo de humidade da sala onde estes foram colocados depois de cada registo, originando assim uma grande variação do valor do peso entre o primeiro e o quarto dia de registos.

Da análise da **Figura 36**, que representa o comportamento do sensor com 0% de NF, é de fácil perceção a grande discrepância de valores da resistividade quando aplicada a diferença de potencial de 3 V em comparação com os 5 e 6 V. Isto deve-se ao facto de como o sensor não possui qualquer tipo de substância condutora, a sua resistividade depende apenas da quantidade de água presente e da composição do próprio sensor, daí estes valores serem bastante elevados. Então, a diferença de potencial reduzida de 3 V não vai influenciar em muito o valor da resistividade, mas quando se incrementa a

diferença de potencial para 6 V já é possível visualizar uma grande redução deste valor. No decorrer dos quatro dias de ensaios, o peso do sensor aumenta gradualmente até ao terceiro dia, registando uma pequena redução no quarto dia, ou seja, existe um acréscimo de humidade ao longo dos primeiros três dias de registo, o que provoca uma diminuição gradual do valor da resistividade.

Ao adicionar 4.5% de NF à mistura, o sensor agora é composto por uma substância condutora o que faz com que a sua resistividade diminua quase para metade, em comparação com o sensor com 0% de NF. A **Figura 37** demonstra o comportamento do sensor com 4.5% de NF, onde é possível observar que a discrepância entre os valores da resistividade quando aplicada a diferença de potencial de 3 V, agora é mais reduzida em comparação com os valores obtidos ao aplicar a diferença de potencial de 5 e 6 V. É também possível visualizar uma grande descida do valor do peso no segundo dia de ensaios sendo registado no terceiro dia um valor muito próximo ao obtido no primeiro dia, isto deu origem a uma subida gradual do valor da resistividade nas três diferentes voltagens aplicadas.

Por fim foram ensaiadas as três amostras do sensor com 6.5% de NF, onde, embora tenham tido diferentes registos do valor do peso verifica-se que os valores da resistividade são muito próximos quando as três diferentes voltagens são aplicadas, registando um decréscimo muito acentuado deste valor ao longo dos dias. Este comportamento ocorre porque, uma vez que o sensor contém uma percentagem mais elevada de NF, a sua tolerância à corrente elétrica é cada vez menor, sendo desta forma mais sensível à presença de humidade.

Numa segunda fase deste estudo, realizou-se a mesma metodologia utilizada anteriormente, com a diferença que desta vez os sensores foram colocados numa sala de ambiente condicionado com temperatura constante de 20 °C e 65% de humidade relativa. O número de dias de registo também variou, sendo cada sensor monitorizado durante 3 dias não consecutivos. O valor do peso foi registado no primeiro dia, deixando um dia de intervalo até ao próximo registo nos dois dias seguintes. Os resultados obtidos de cada sensor estão representados nas **Figuras 41 a 45**.

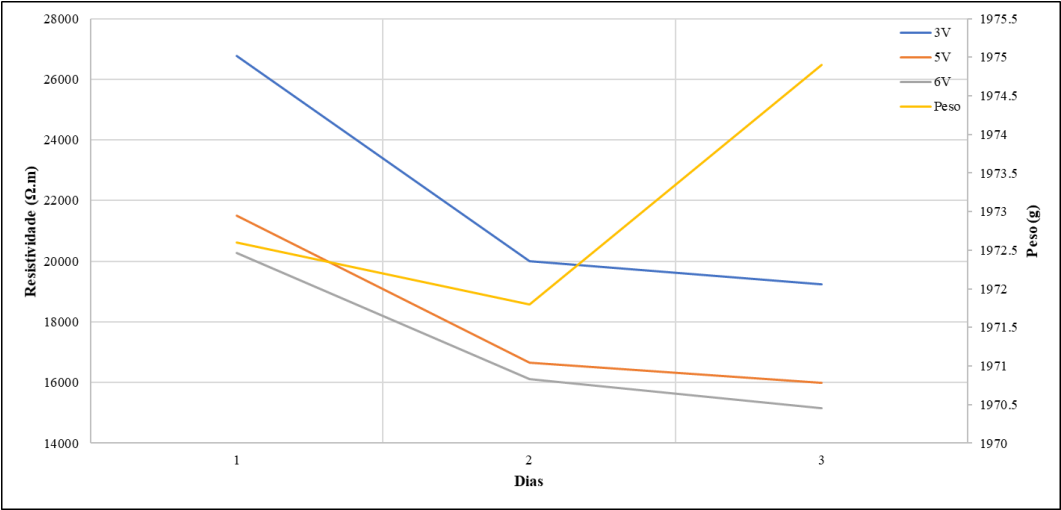


Figura 41. Comportamento do sensor com 0% de NF em ambiente condicionado

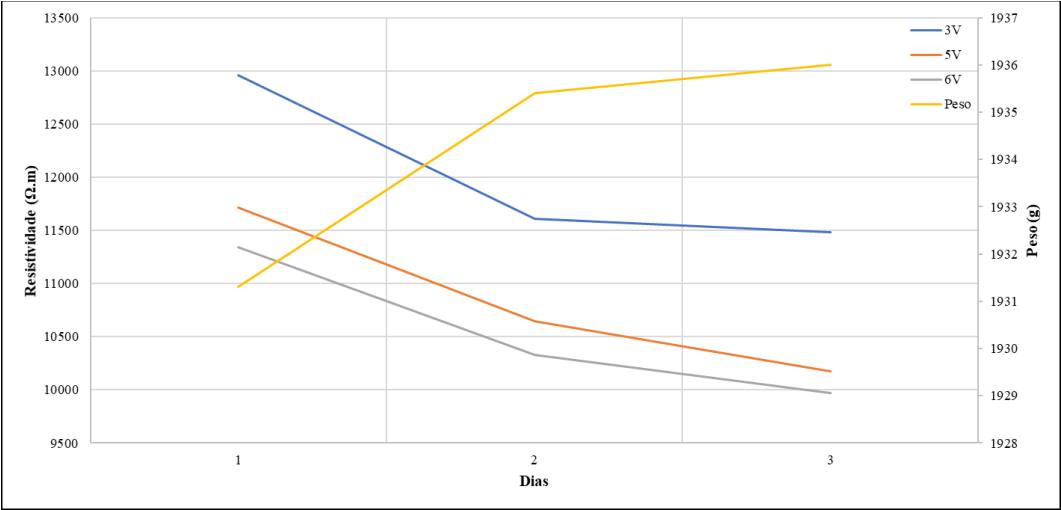


Figura 42. Comportamento do sensor com 4.5% de NF em ambiente condicionado

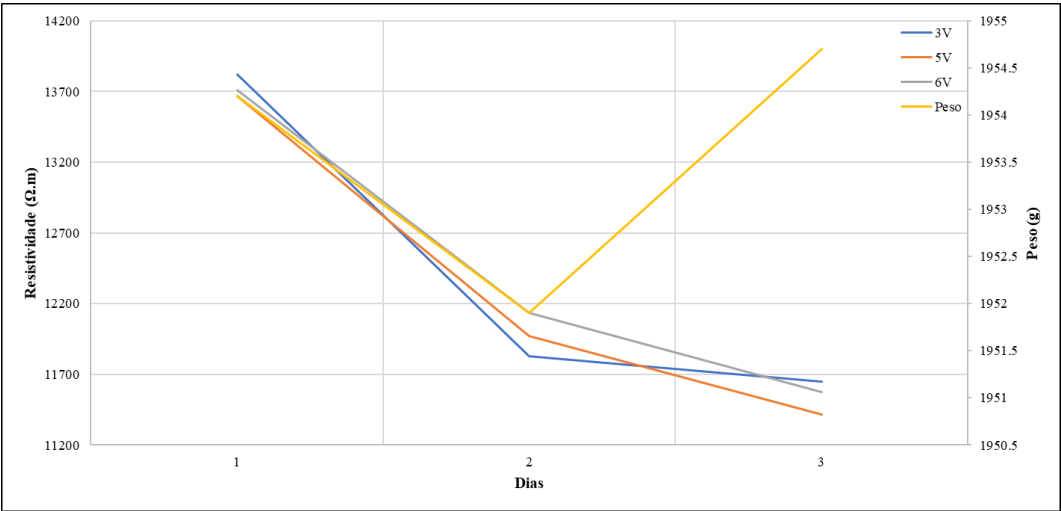


Figura 43. Comportamento da amostra 1 do sensor com 6.5% de NF em ambiente condicionado

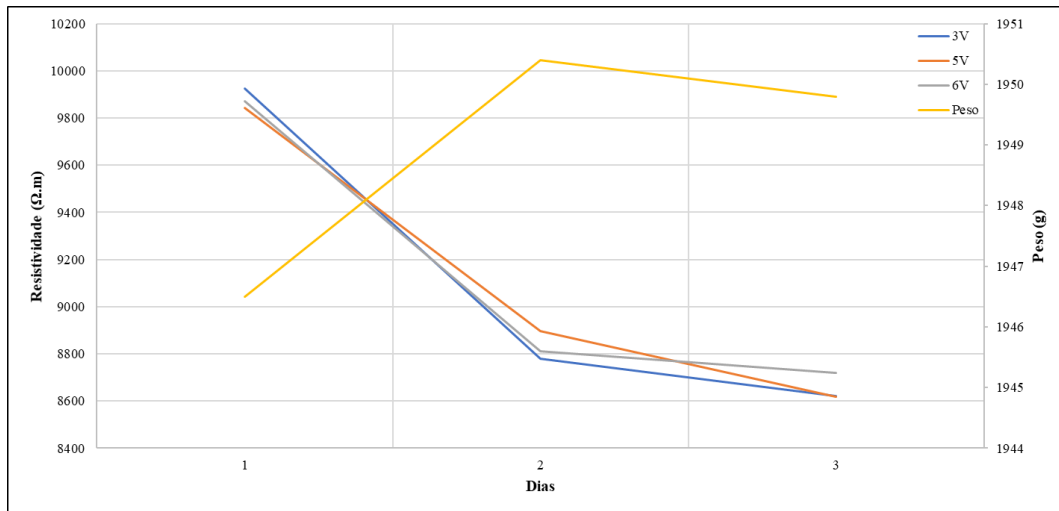


Figura 44. Comportamento da amostra 2 do sensor com 6.5% de NF em ambiente condicionado

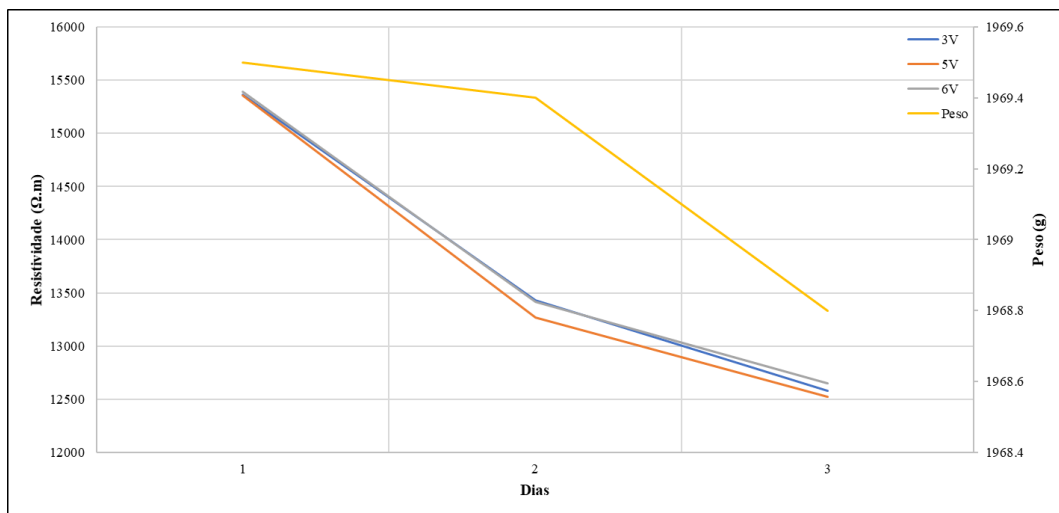


Figura 45. Comportamento da amostra 3 do sensor com 6.5% de NF em ambiente condicionado

Apesar dos sensores terem permanecido na sala de ambiente condicionado, é também registado um valor inconstante de peso ao longo dos três dias de ensaio, no entanto é possível verificar que a variação deste valor é muito menor, quando comparado com os ensaios da fase anterior.

Analisando as **Figuras 41 a 45** é possível observar um decréscimo geral do valor da resistividade em todos os sensores, no entanto existe uma semelhança no comportamento dos sensores em relação a este valor, com exceção do sensor com 4.5% de NF onde agora também se verifica uma descida gradual da resistividade ao longo dos dias. No entanto constata-se que a distinção destes valores nos sensores com 6.5% de NF quando aplicado as três diferentes voltagens é cada vez menos evidente.

Depois deste estudo, os sensores foram submetidos a quatro tipos diferentes de ensaios, os quais vão ser descritos em seguida.

Em todos os ensaios realizados foi aplicada, a uma velocidade de 250 N/s uma força de compressão até atingir 2 kN, permanecendo neste valor durante 120 segundos, desta forma a estabilização da resistividade de cada sensor é garantida, diminuindo assim a probabilidade de registar valores incorretos de resistividade.

O primeiro ensaio consistiu na aplicação de uma carga cíclica de 80 kN durante 10 ciclos a uma velocidade de 1500 N/s. Posteriormente foi realizado um ensaio semelhante, com exceção da carga aplicada, sendo esta de 25 kN. No ensaio seguinte a carga cíclica manteve-se, aumentando apenas o número de ciclos para 30. Por fim realizou-se o ensaio a uma velocidade de 1000 N/s com ciclos de carga crescente de 5 kN a 80 kN com um incremento de 5 kN por ciclo, ou seja, a prensa foi programada de forma a aplicar uma força depois da estabilização da resistividade de 5 kN voltando à força inicial de 2 kN, em seguida a força aumenta para 10 kN e assim sucessivamente até atingir o valor de 80 kN. Cada ensaio foi realizado com o intuito de simular diferentes situações de tráfego numa via de circulação rodoviária.

Todos os ensaios foram realizados com a aplicação de duas diferenças de potencial, uma de 12 V e outra de 24 V, com exceção do ensaio com a carga cíclica de 80 kN sendo que apenas foi aplicada uma diferença de potencial de 12 V. Uma nota importante foi o facto de ao contrário dos provetes com $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ que eram constituídos por quatro eléctrodos o cálculo da resistência era realizada automaticamente pelo *Data Taker*, os sensores $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, como são constituídos apenas por dois eléctrodos sempre que a diferença de potencial era alterada, era necessário aplicar essa alteração manualmente na fórmula da **Equação 2** antes de iniciar cada ensaio.

Por fim também foi necessário a alteração da **Equação 3**, pois apesar do espaçamento entre os eléctrodos do provete e dos sensores ser igual, a área de secção transversal do eléctrodo, ou seja, a área de contacto entre os eléctrodos e o sensor é diferente, sendo utilizado $3 \times 3 \text{ cm}^2$ para os provetes e $9 \times 9 \text{ cm}^2$ para os sensores.

Todos os sensores permaneceram numa sala de ambiente acondicionado com temperatura constante de 20 °C e 65% de humidade relativa durante todo o período de ensaios.

7. Análise de resultados

Uma vez conhecidos todos os ensaios realizados, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada ensaio, sendo assim possível perceber como é que os sensores com diferentes percentagens de NF se comportavam quando sujeitos a diferentes tipos de força e diferença de potencial aplicada. Para cada ensaio foram desenvolvidos quatro gráficos distintos, de forma a facilitar a análise da informação obtida.

Inicialmente obteve-se o gráfico da relação da força aplicada com a deformação, com o intuito de verificar a deformação de cada sensor ao longo dos diferentes ciclos de carga. Foi também estudado a mudança fracionária da resistividade (MFR), sendo esta apresentada em dois gráficos distintos, MFR e deformação ao longo do tempo e MFR em relação à deformação. Por fim foi também verificado a variação de temperatura em relação à carga aplicada, no entanto, este gráfico só foi apresentado nos ensaios dos sensores, uma vez que o provete $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ não contém qualquer tipo de sensor de temperatura.

Antes de prosseguir à análise dos resultados obtidos, convém perceber do que se trata a mudança fracionária da resistividade (MFR) que é representada pela **Equação 16**. Sendo obtida dividindo a diferença da resistividade final $\rho(t)$ e inicial ρ_0 , pela resistividade inicial ρ_0 .

$$MFR = \frac{\rho(t) - \rho_0}{\rho_0} \quad (16)$$

Assim é possível compreender o que acontece à resistividade do provete quando a força é aplicada e relacionar este resultado com a deformação do sensor, se o provete ou sensor possuir um comportamento piezoresistivo, a resistividade diminui à medida que a força aumenta, o que é compreensível visto que as partículas de negro de fumo vão ficar mais próximas umas das outras e consequentemente a circulação da corrente elétrica torna-se mais fácil.

Em primeiro lugar são analisados os gráficos obtidos do primeiro ensaio realizado aos provetes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, pois estes tiveram uma grande importância no decorrer deste trabalho, permitindo verificar o comportamento piezoresistivo da mistura utilizada para

o fabrico dos sensores bem como a desenvolver e conhecer o sistema de aquisição de dados.

A **Figura 46** representa a força aplicada em relação à deformação onde se verifica que a deformação sofre um ligeiro incremento ao longo do ensaio, isto pode ser explicado pelo facto de o provete manifestar um comportamento plástico, ou seja, a deformação que ocorre quando a força é aplicada não se anula totalmente quando esta retorna ao valor inicial.

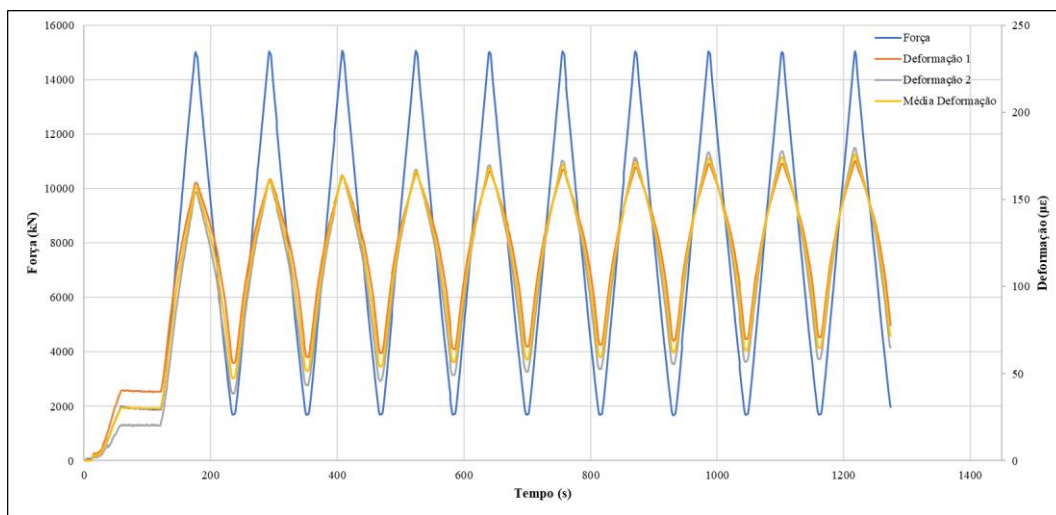


Figura 46. Força vs Deformação

A piezoresistividade do material foi o fator fundamental durante este estudo, pois sem a piezoresistividade, os sensores não serviam a sua funcionalidade passando a ser apenas objetos estruturais e não de monitorização.

Ao analisar a **Figura 47** é possível observar o comportamento piezoresistivo do provete, onde existe uma proporção quase perfeita em relação à diminuição da resistividade à medida que a deformação aumenta, ou seja, a resistividade do sensor diminui e aumenta proporcionalmente à medida que os ciclos de força são aplicados.

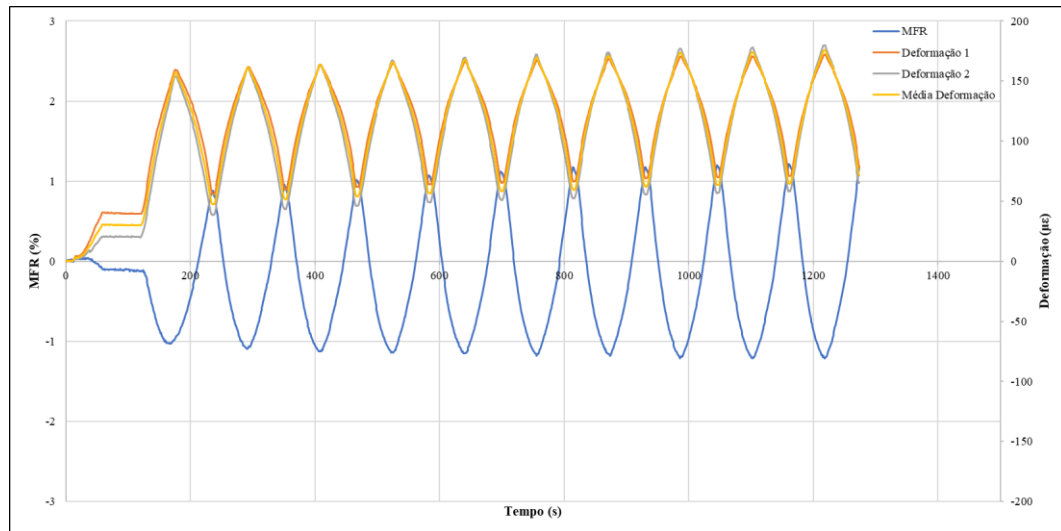


Figura 47. MFR vs Deformação vs Tempo

A **Figura 48** representa uma linha de tendência linear entre a MFR e a deformação do provete, sendo esta quantificada pelo coeficiente de determinação (R^2), este valor varia entre zero e um, sendo que quanto mais próximo de um for o valor e quanto maior for a amplitude da MFR, mais piezoresistivo é o sensor, ou seja, mais proporcional é a relação entre a MFR e a deformação do sensor. Neste caso com um coeficiente de determinação de 0.947, pode dizer-se que o provete apresenta um comportamento piezoresistivo.

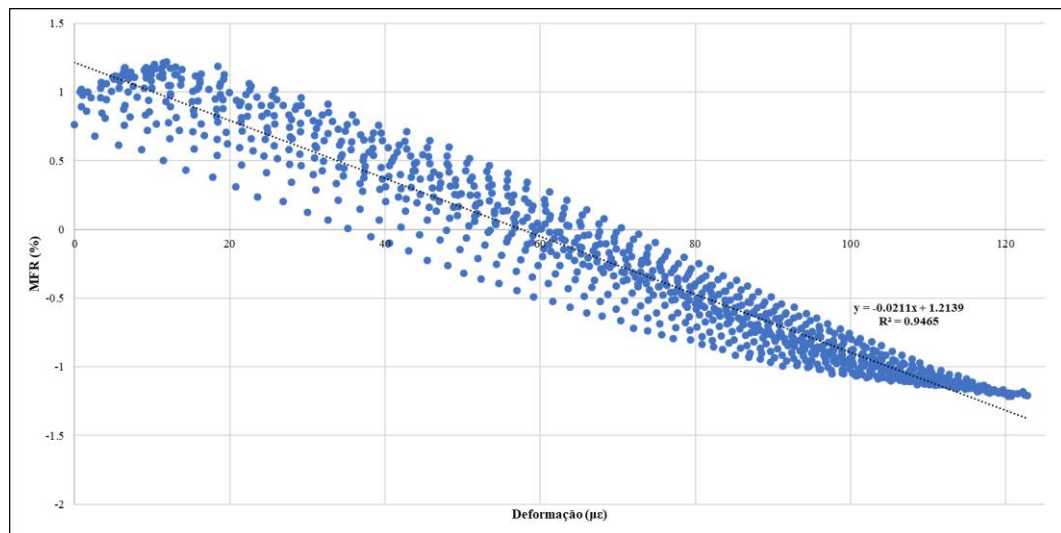


Figura 48. MFR vs Deformação

De seguida são apresentados os gráficos mais relevantes e as maiores diferenças encontradas, de forma a simplificar a análise de resultados. Todos os gráficos obtidos da MFR vs Deformação vs Tempo e da MFR vs Deformação dos sensores com 0%, 4.5% e da amostra 3 com 6.5% de NF são apresentados em Anexo.

As **Figuras 49 a 52** representam a Força vs Deformação do ensaio de 5 a 80 kN com diferenças de potencial de 12 e 24 V aplicadas ao sensor de 0%, 4.5% e à amostra 3 do sensor com 6.5% de NF. É possível verificar que todos os sensores demonstram um comportamento semelhante em relação à deformação à medida que o ensaio decorre sendo também possível concluir que a quantidade de NF em cada sensor bem como a diferença de potencial aplicada não influencia a variação da deformação.

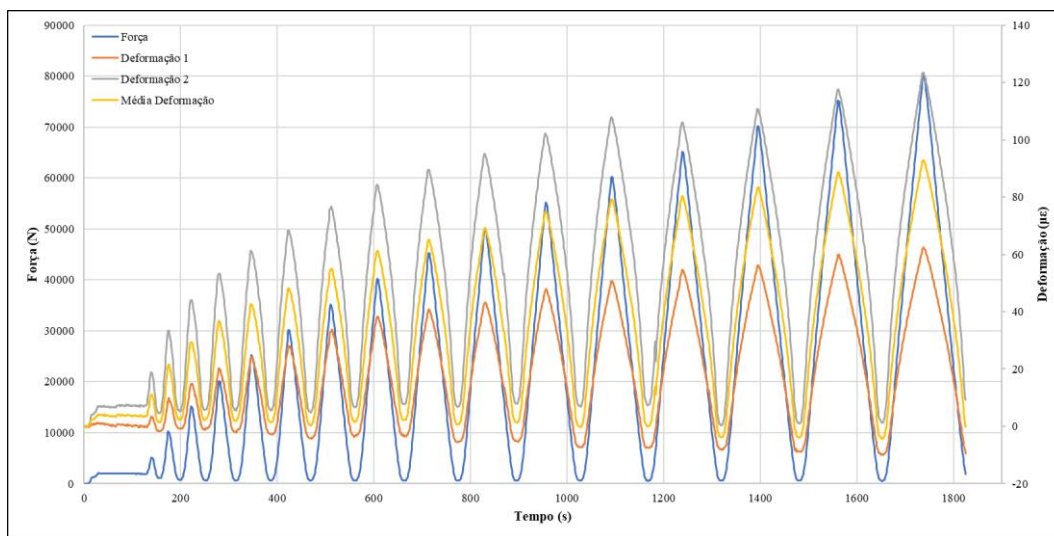


Figura 49. Força vs Deformação sensor com 0% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 12 V

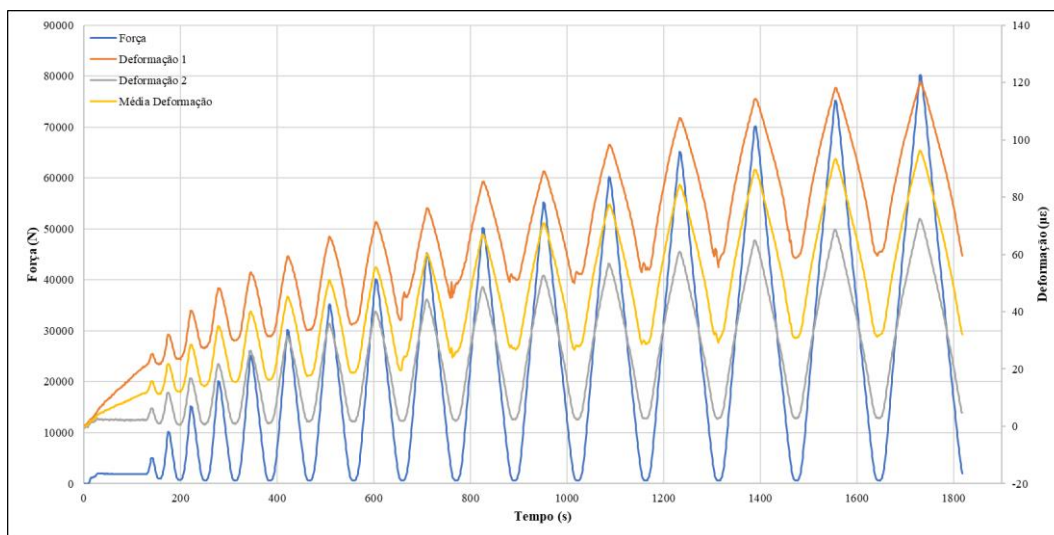


Figura 50. Força vs Deformação sensor com 4.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 24 V

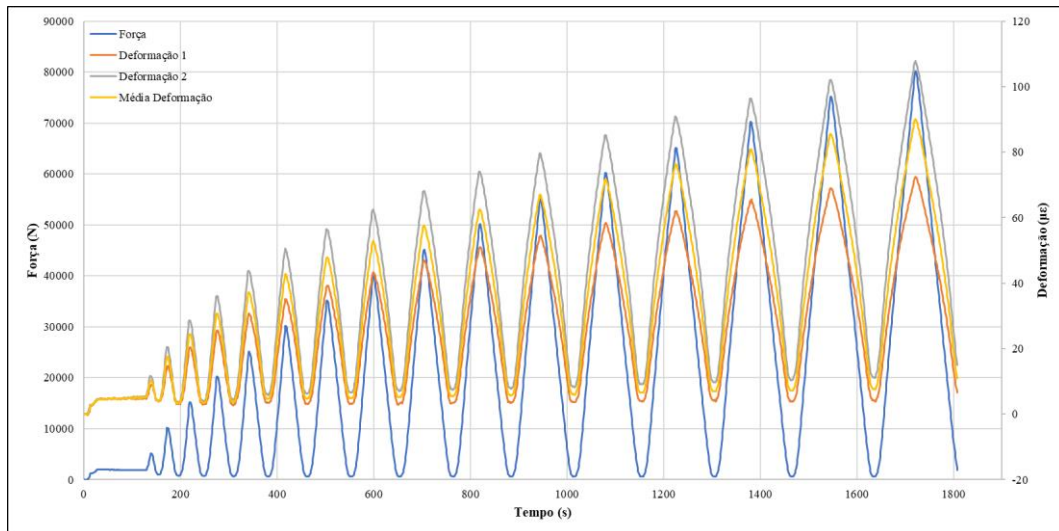


Figura 51. Força vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 12 V

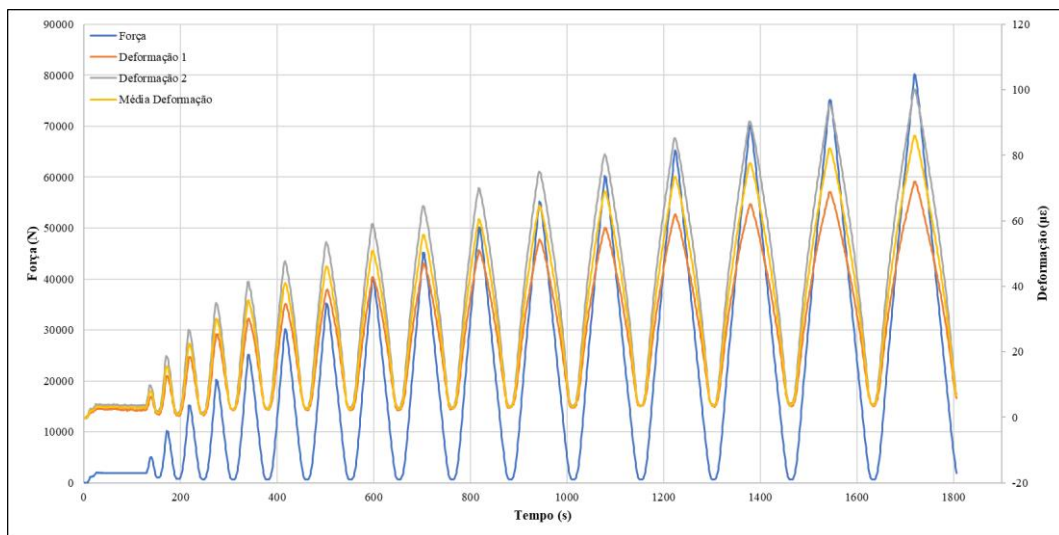


Figura 52. Força vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 24 V

A mesma situação acontece ao comparar as **Figuras 53 a 56**, que representam a temperatura do sensor ao longo de dois tipos distintos de ensaios, o de 5 a 80 kN e o de 25 kN com 30 ciclos. Verifica-se que independentemente do tipo de carregamento no sensor, da percentagem de NF e da diferença de potencial aplicada, existe constantemente um incremento de temperatura ao longo do ensaio.

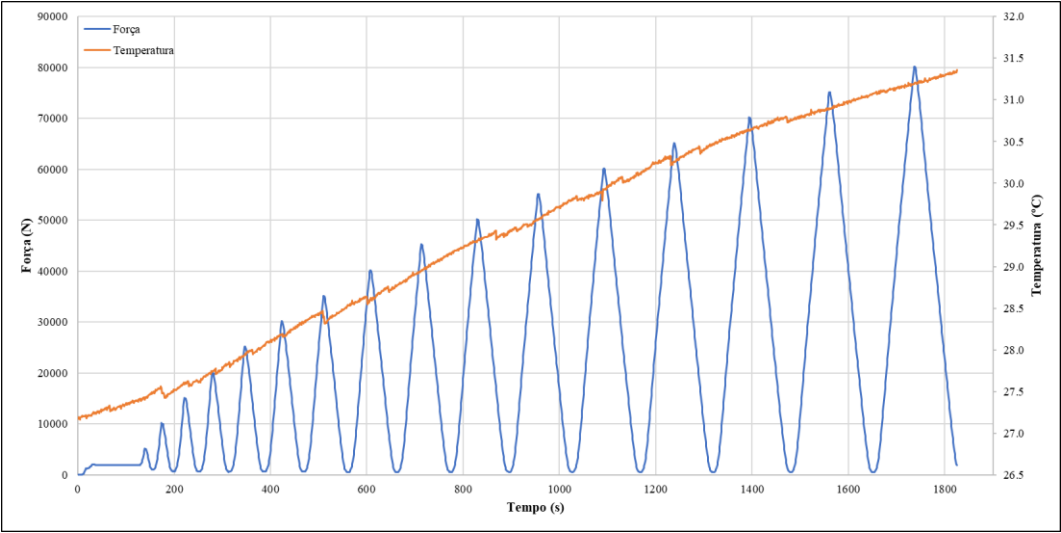


Figura 53. Força vs Temperatura sensor com 0% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 12 V

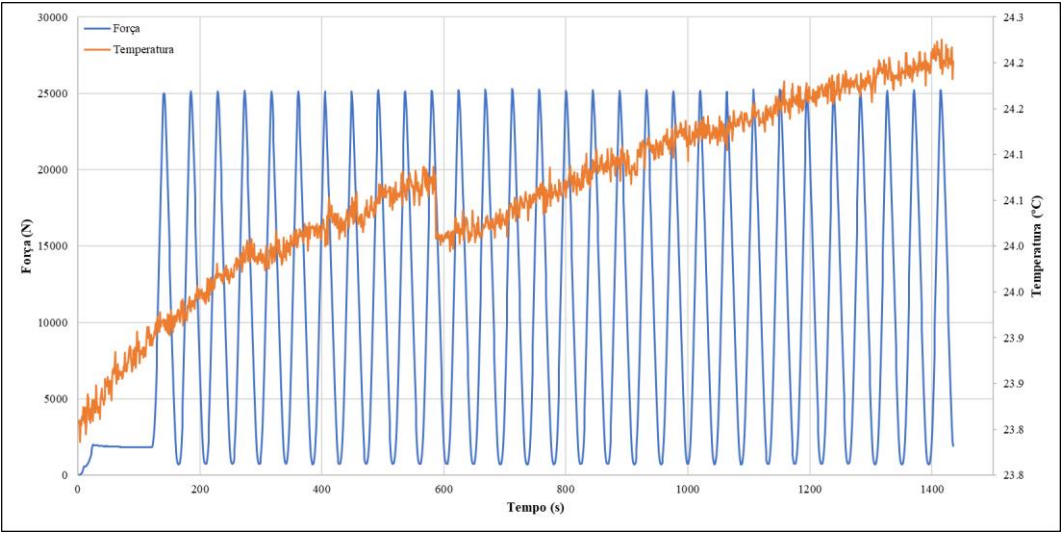


Figura 54. Força vs Temperatura sensor com 4.5% de NF Ensaio 25 kN 30 ciclos a 12 V

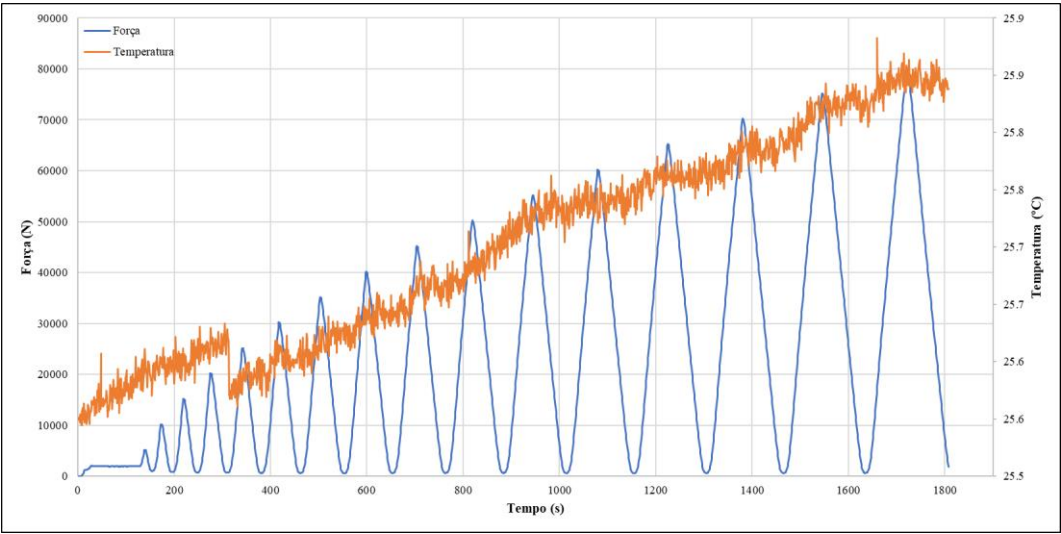


Figura 55. Força vs Temperatura amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 12 V

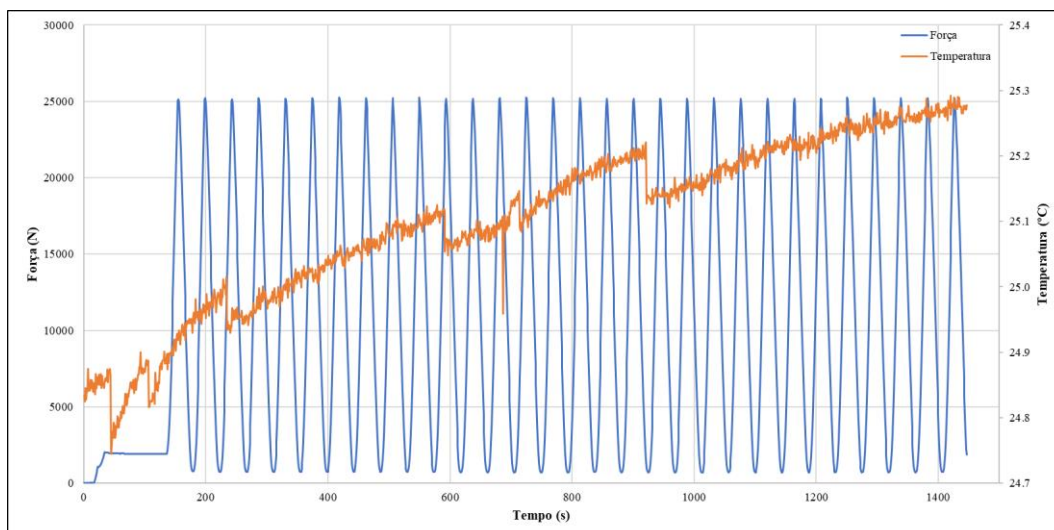


Figura 56. Força vs Temperatura amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 25 kN 30 ciclos a 24 V

Seguidamente vão ser comparados os gráficos relativos à MFR, sendo assim possível compreender como é que as diferentes percentagens de NF afetam o comportamento piezoresistivo de cada sensor. No entanto é necessário explicar o método utilizado para a realização dos gráficos da linha de tendência entre a MFR e a deformação do sensor. De forma a representar os valores que correspondem apenas aos ciclos de carga realizados, a estabilização de dois minutos do início de cada ensaio foi retirada. Nos ensaios onde existe uma não coerência da deformação registada pelos dois sensores, foi selecionado apenas um extensómetro.

No caso do sensor com 0% de NF quando submetido ao ensaio de 5 a 80 kN observa-se uma diferença substancial quando as diferenças de potencial de 12 e 24 V são aplicadas. As **Figuras 57 e 58** representam o comportamento do sensor com uma diferença de potencial de 12 V, e verifica-se que apesar de existir uma variação da resistividade em relação à deformação, essa variação não é proporcional, a amplitude é muito semelhante e não altera à medida que o ciclo de carga aumenta, daí a linha de tendência apresentar um coeficiente de determinação de 0.644.

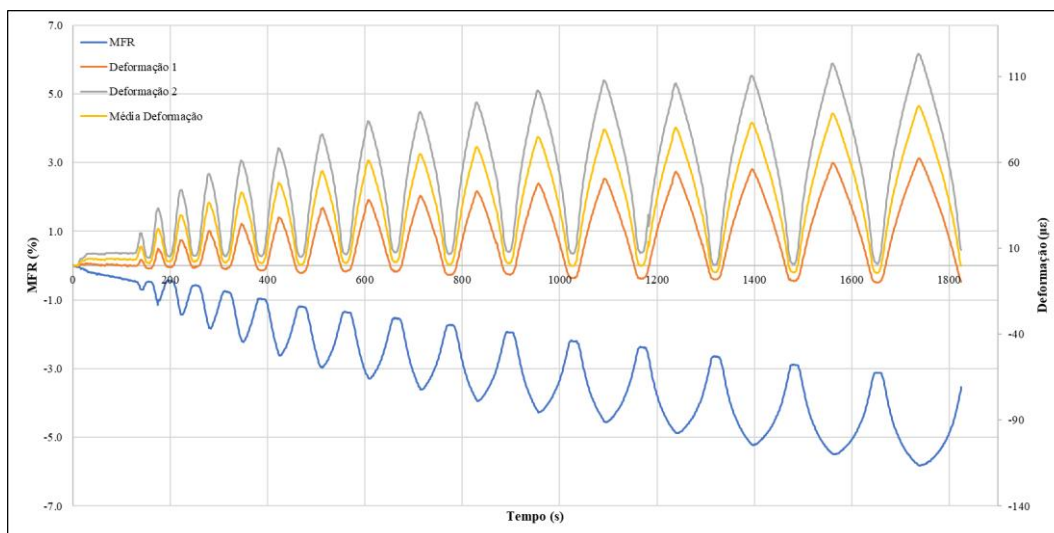


Figura 57. MFR vs Deformação vs Tempo sensor com 0% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 12 V

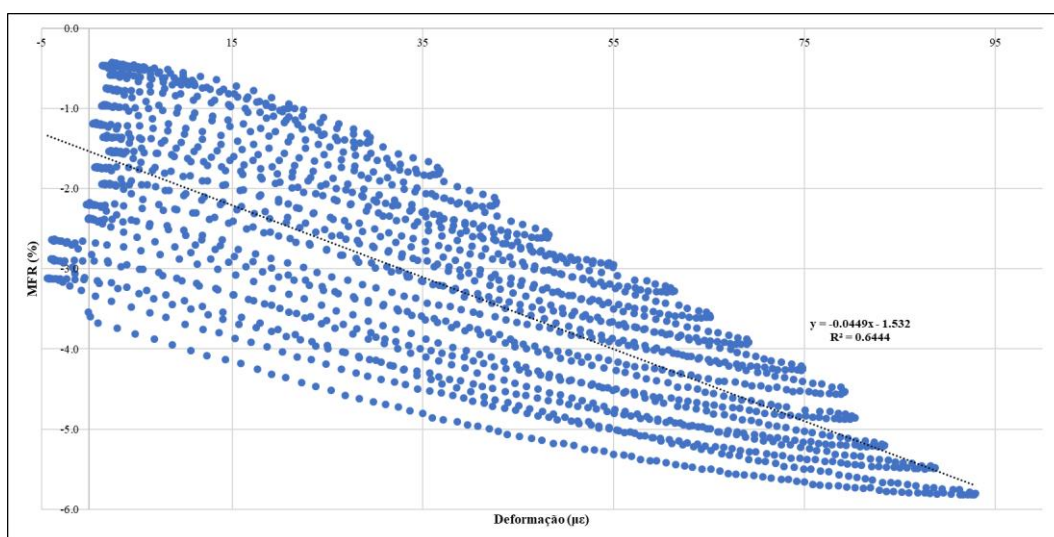


Figura 58. MFR vs Deformação sensor com 0% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 12 V

No entanto, quando se observa as **Figuras 59 e 60** a variação da resistividade em relação à deformação é quase simétrica o que explica o valor de 0.951 na linha de tendência. No entanto este resultado não é representativo da realidade, uma vez que como este sensor não possui qualquer tipo de condutor, o comportamento piezoresistivo devia ser inexistente. Uma possível explicação para esta ocorrência pode ser o facto deste sensor não estar completamente seco quando os ensaios foram realizados.

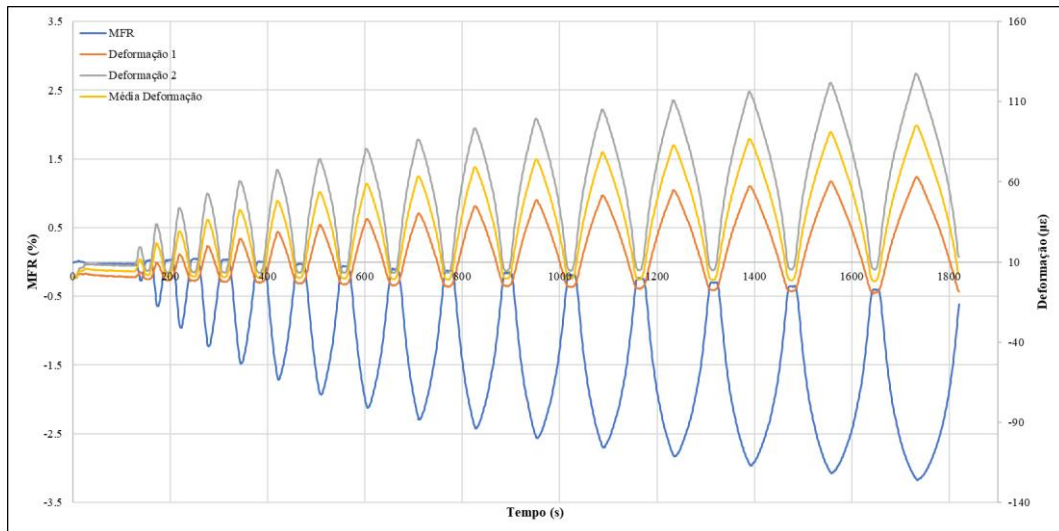


Figura 59. MFR vs Deformação vs Tempo sensor com 0% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 24V

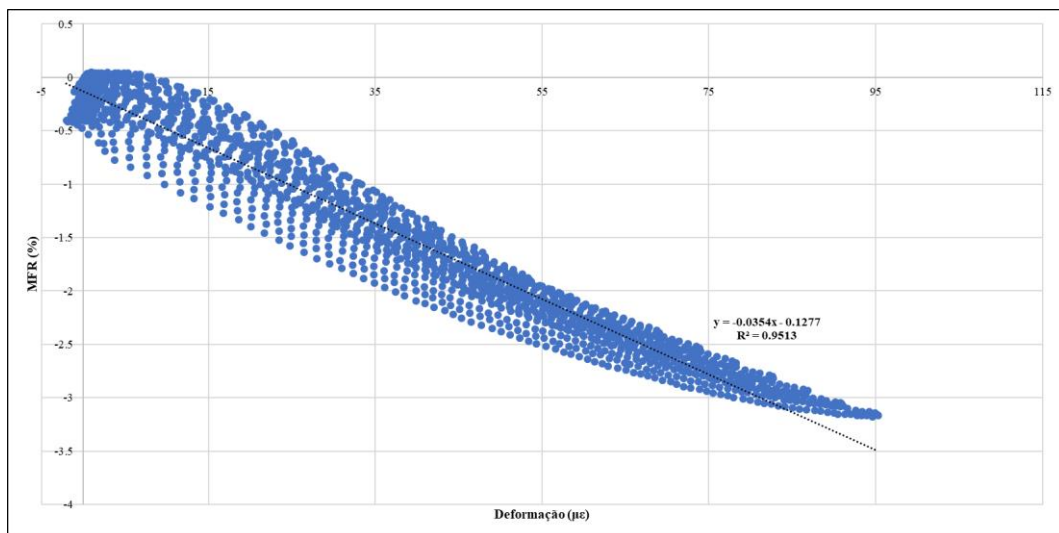


Figura 60. MFR vs Deformação sensor com 0% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 24 V

Uma vez que a informação da MFR é mais precisa e fácil de explicar ao observar a linha de tendência da MFR em relação à deformação, seguidamente vão ser apresentados apenas os gráficos da MFR vs Deformação dos sensores com 4.5% e 6.5% de NF quando sujeitos aos diferentes tipos de ensaios.

Ao observar a **Figura 61 e 62** verifica-se que o comportamento piezoresistivo do sensor com 4.5% de NF quando realizado o ensaio de 5 a 80 kN é diferente, quando são aplicadas as duas diferenças de potencial. De facto, existe um decréscimo significativo do valor de R^2 quando a diferença de potencial de 24 V é aplicada, quando comparada com a de 12 V, apresentando um valor de 0.224 e 0.764 respetivamente.

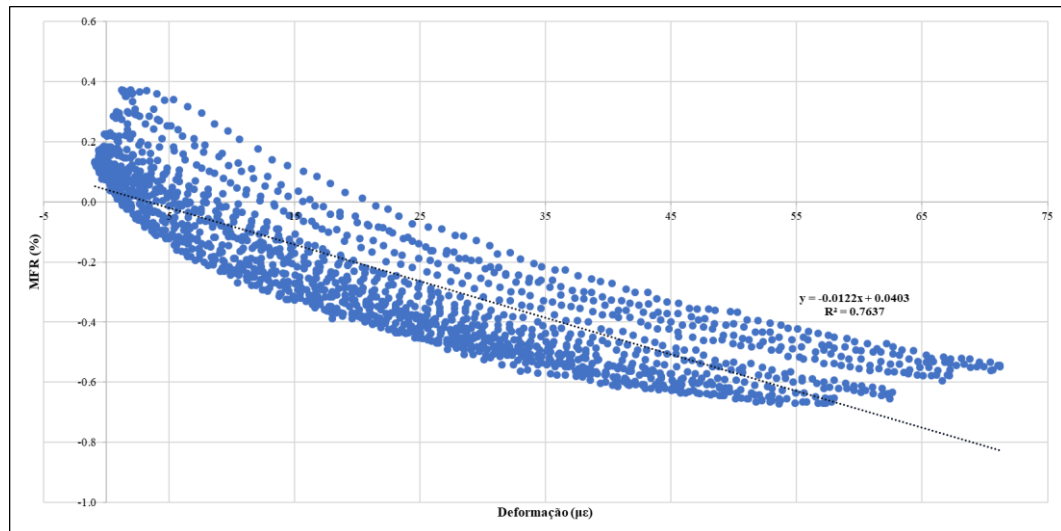


Figura 61. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 12 V

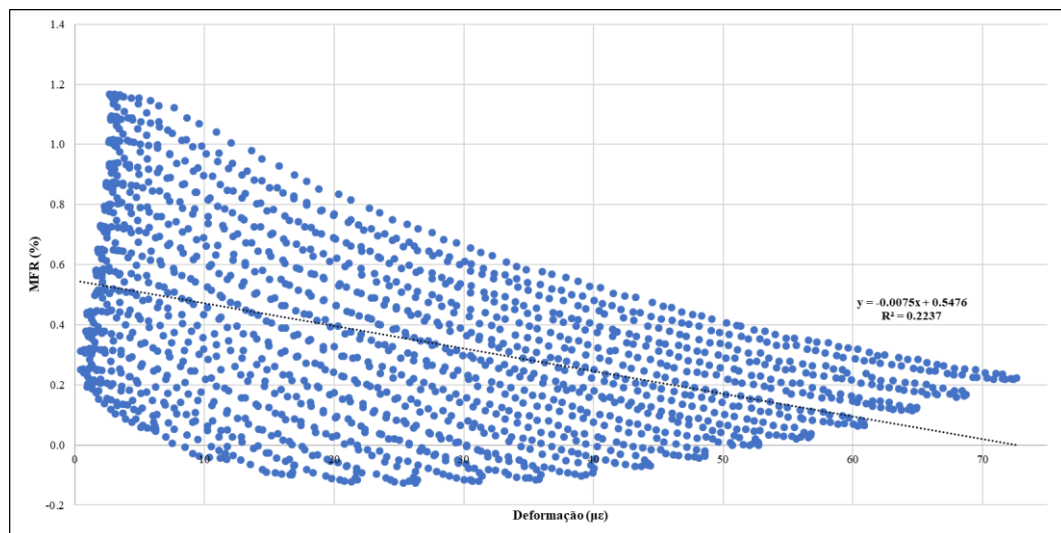


Figura 62. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 24 V

No entanto, quando se observa a **Figura 63 e 64**, é possível notar que existe uma melhoria significativa na proporcionalidade da alteração da MFR em relação à deformação quando é realizado o ensaio de 25 kN com 30 ciclos, sendo possível observar uma ligeira melhoria quando a diferença de potencial de 24 V é aplicada quando comparada com a de 12 V.

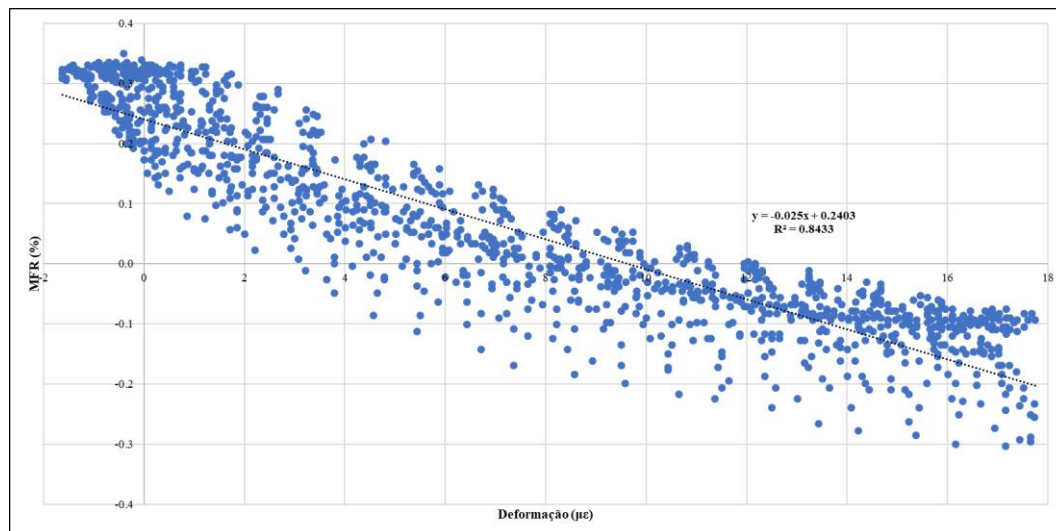


Figura 63. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF Ensaio 25 kN 30 ciclos a 12 V

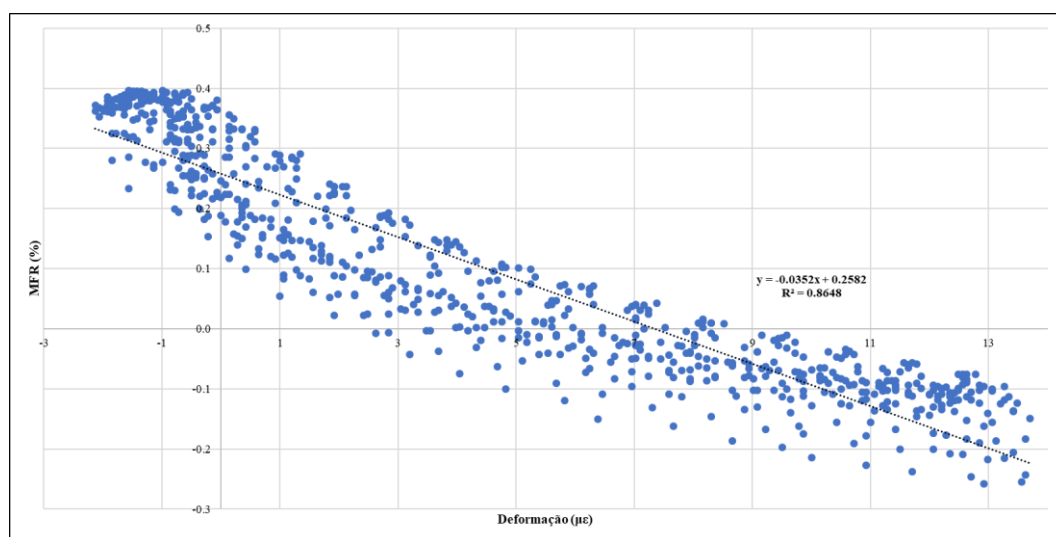


Figura 64. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF Ensaio 25 kN 30 ciclos a 24 V

Ao observar as linhas de tendência amostra 3 do sensor com 6.5% NF quando sujeita ao ensaio de 5 a 80 kN, é possível concluir que o comportamento piezoresistivo do sensor é quase nulo, uma vez que os valores de R^2 são praticamente zero, quando as duas diferenças de potencial são aplicadas, (**Figura 65 e 66**).

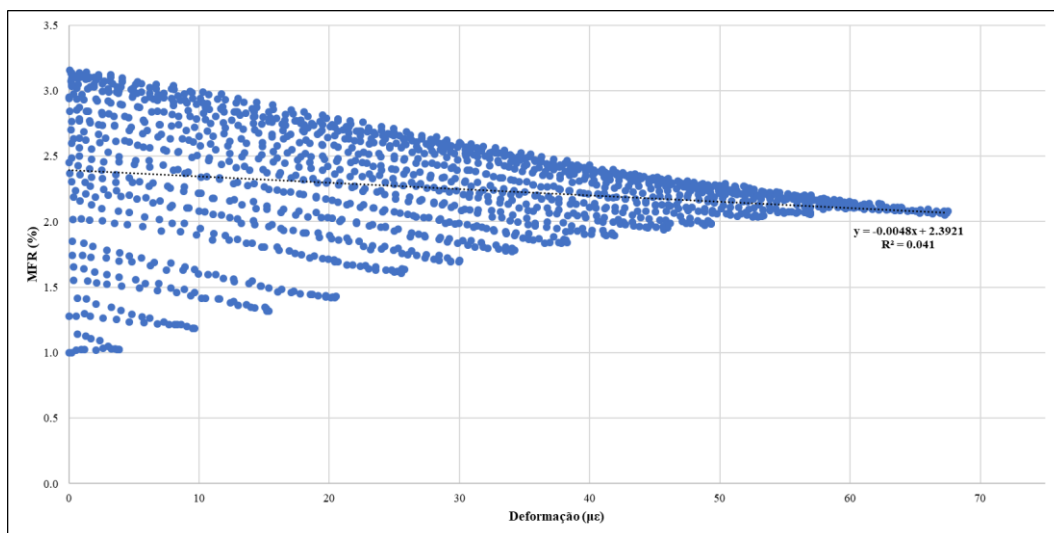


Figura 65. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 12 V

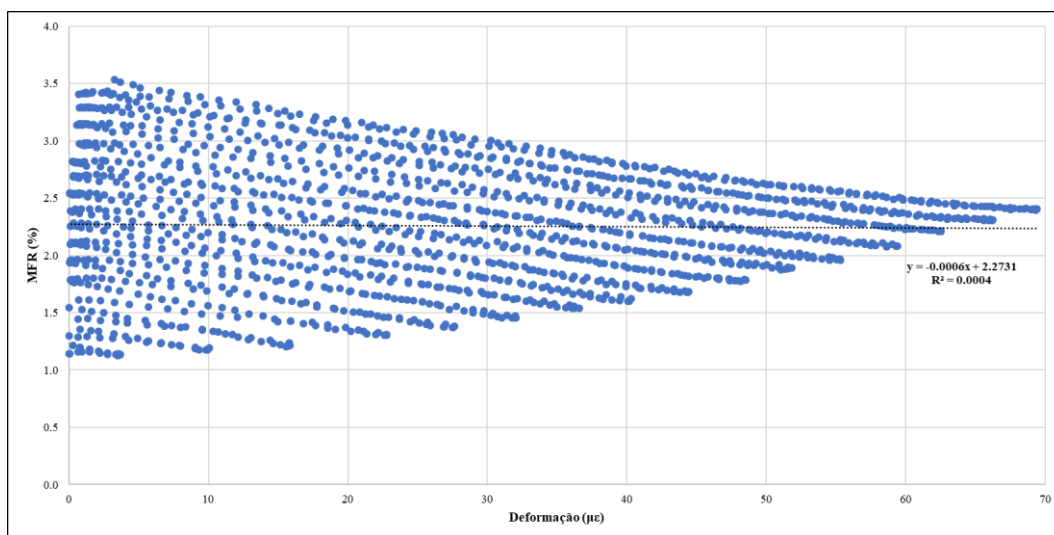


Figura 66. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 24 V

Se a linha de tendência for representada para cada ciclo, o comportamento é bastante diferente, sendo registado um comportamento piezoresistivo do sensor, como pode ser observado na **Figura 67**, que representa os ciclos de 80, 40 e 10 kN da amostra 3 do sensor com 6.5% de NF. No entanto este comportamento reflete apenas cada ciclo individual, não representando o comportamento do sensor no ensaio completo.

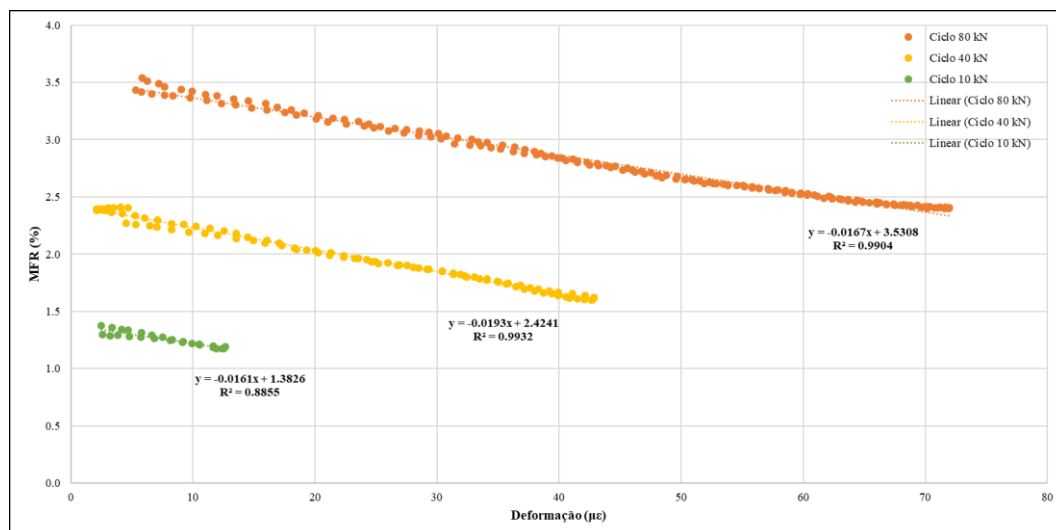


Figura 67. MFR vs Deformação Ciclos isolados da amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 5 a 80 kN a 24 V

Também se verifica através da observação das linhas de tendência das **Figuras 68 e 69**, que a alteração do tipo de carregamento influenciou bastante a variação da MFR em relação à deformação. Quando o ensaio de 25 kN com 30 ciclos é realizado a leitura no que diz respeito à proporcionalidade da variação da MFR em relação à deformação do sensor é bastante melhor quando comparada com o ensaio de 5 a 80 kN.

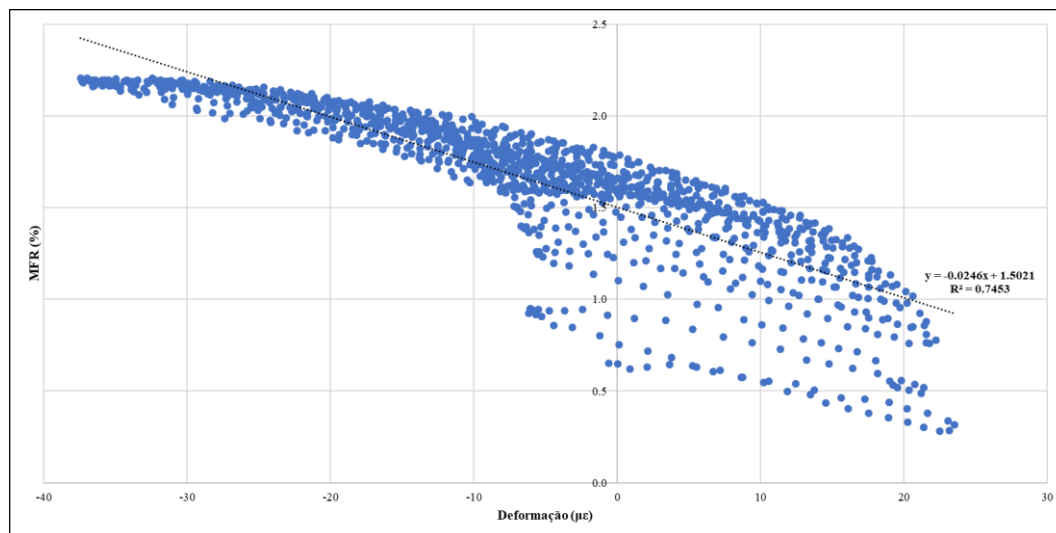


Figura 68. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 25 kN 30 ciclos a 12 V

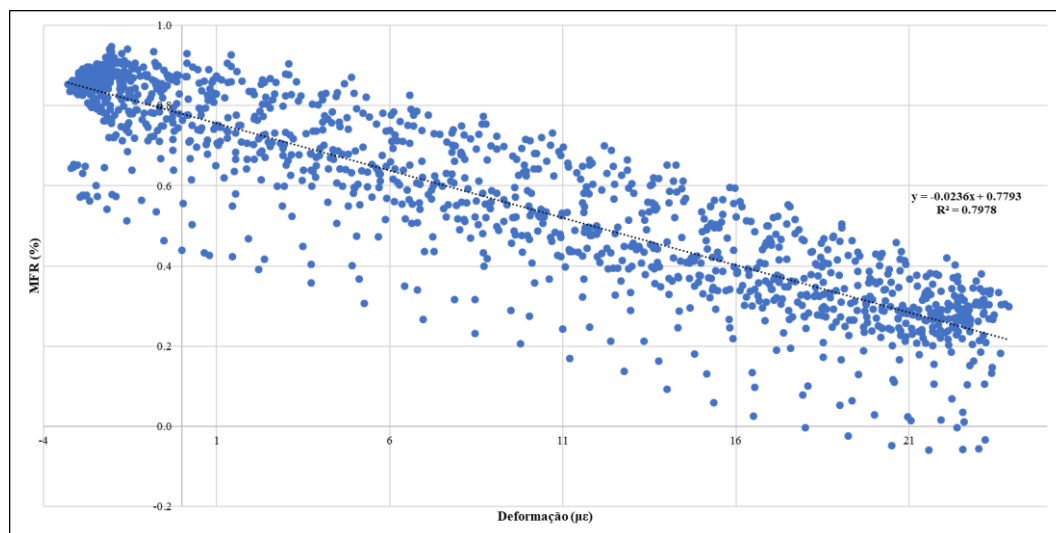


Figura 69. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 25 kN 30 ciclos a 24 V

No entanto convém mencionar o estranho comportamento do sensor observado na **Figura 68**, de facto existe um aumento gradual da MFR à medida que o ensaio decorre, enquanto que apesar da amplitude da variação da deformação se manter constante, esta variação diminui gradualmente como pode ser observado na **Figura 70**.

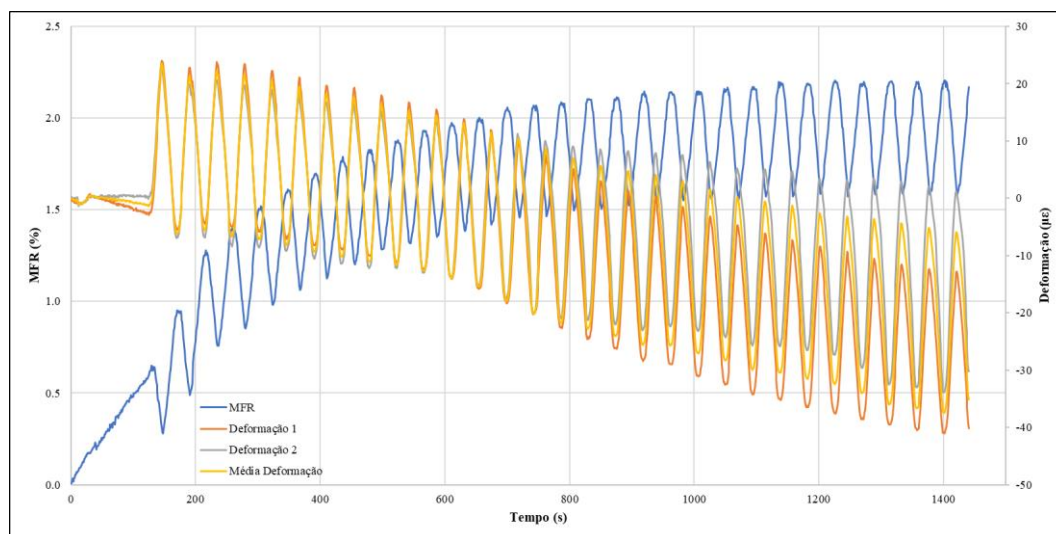


Figura 70. MFR vs Deformação vs Tempo amostra 3 do sensor com 6.5% de NF Ensaio 25 kN 30 ciclos a 12 V

Uma vez que a capacidade piezoresistiva de um material é quantificada pelo *parâmetro GF*, a sua determinação é essencial de forma a compreender a alteração do comportamento piezoresistivo de cada sensor quando sujeito aos diferentes ensaios realizados, (**Equação 17**). No entanto, de forma a não comprometer os resultados do GF e com o objetivo de dissipar possíveis erros de leitura registados em alguns ensaios dado que se trata de um trabalho laboratorial, nomeadamente no ensaio de 25 kN com 30 ciclos

a 24 V no sensor com 0% de NF, onde só foi obtido um registo de 29 ciclos e no ensaio de 25 kN com 30 ciclos a 12 e 24 V da amostra 2 do sensor com 6.5% de NF onde só se obteve o registo de 21 ciclos, só vão ser determinados os GF do sensor com 4.5% de NF e da amostra 3 do sensor com 6.5% de NF.

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (17)$$

Sendo ΔR a média da variação da resistência do sensor, R a média da resistência do sensor e ε a média da deformação registada, sendo necessário multiplicar o valor da média da deformação por 10^{-6} , uma vez que o valor da deformação registado pelo *Data Taker* está em $\mu\varepsilon$.

As **Figuras 71 e 72** representam os valores do GF dos sensores com 4.5% de NF e da amostra 3 do sensor com 6.5% de NF respetivamente.

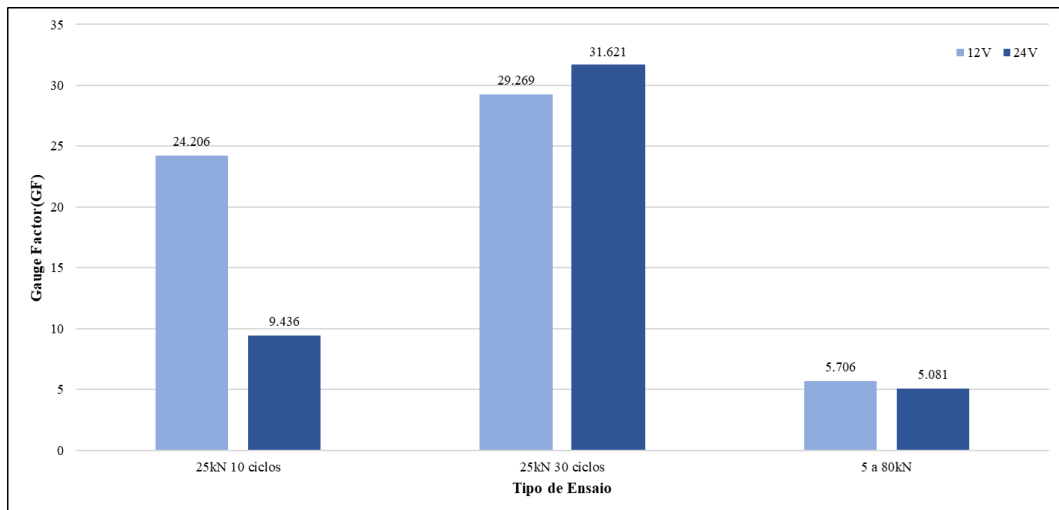


Figura 71. GF dos sensores com 4.5% de NF

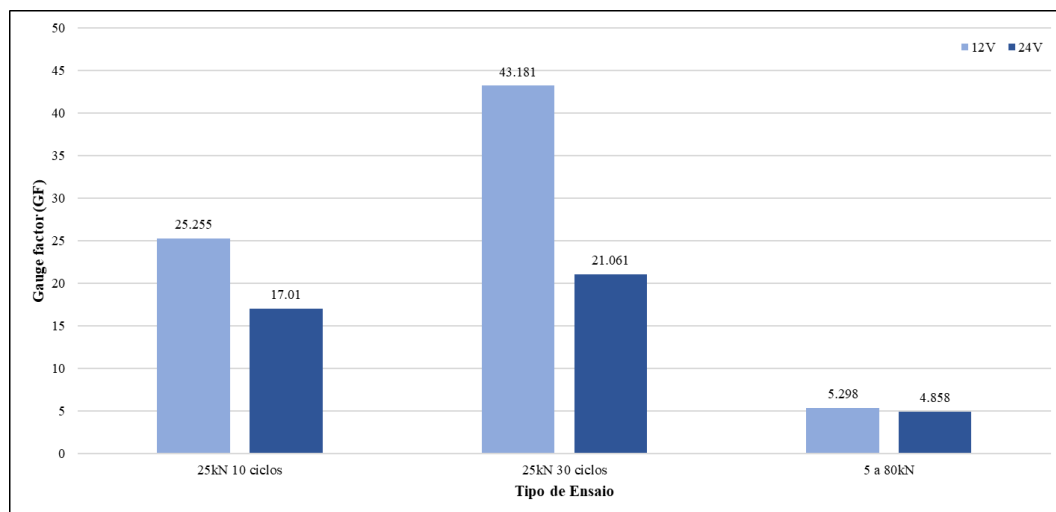


Figura 72. GF da amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

Para os ensaios de 80 kN com 10 ciclos a 12 V foi obtido um GF de 3.752 e 3.386, respetivamente.

Através da análise das **Figuras 71 e 72**, verifica-se que, apesar de existir um ligeiro aumento do GF no sensor com 6.5% de NF, este valor não difere muito quando comparado com o sensor com 4.5%, no entanto é também possível observar que o tipo de carregamento e a diferença de potencial aplicada são dois fatores que influenciam o comportamento piezoresistivo de cada sensor. No ensaio com ciclos crescentes de 5 a 80 kN é evidente o baixo valor do GF em ambos os sensores, sendo que a diferença entre as duas diferenças de potencial aplicadas é quase nula, isto significa que o comportamento piezoresistivo dos sensores quando realizado este ensaio é praticamente nulo. O mesmo não se verifica nos ensaios com ciclos simétricos de 25 kN, onde o aumento do número de ciclos melhora significativamente o comportamento piezoresistivo do sensor. Com exceção do ensaio de 25 kN com 30 ciclos no sensor com 4.5% de NF onde existe um ligeiro aumento do GF quando aplicada a diferença de potencial de 24 V, em todos os outros casos é de fácil perceção que a piezoresistividade de cada sensor diminui quando a diferença de potencial aumenta.

8. Conclusões e trabalhos futuros

Esta dissertação consistiu no desenvolvimento e estudo de um sensor de deformação com matriz cimentícia piezoresistiva, através da adição de uma substância condutora, nomeadamente o negro de fumo, com o intuito de num futuro próximo possa vir ser utilizado para a gestão e monitorização a longo prazo de infraestruturas rodoviárias. Este trabalho dividiu-se em duas fases distintas. A primeira consistiu na escolha da percentagem de negro de fumo a utilizar para o fabrico do sensor, para tal foi desenvolvido um provete com 6.5% de negro de fumo de dimensões $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, sendo este posteriormente testado e verificado o seu comportamento piezoresistivo. Numa segunda fase foram realizados três sensores de dimensões $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ com três diferentes percentagens de negro de fumo aplicadas, 0%, 4.5% e 6.5%. Posteriormente foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados com o auxílio de um Software de computador e do *Data Taker DT80*, sendo assim possível registar vários componentes em cada ensaio realizado aos sensores, tais como, a deformação axial, a resistência elétrica, a resistividade e a temperatura. No presente capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido e as perspectivas de trabalhos futuros.

8.1 Principais conclusões

Neste trabalho, os sensores desenvolvidos foram sujeitos a quatro diferentes tipos de ensaios, com o intuito de simular diferentes situações de tráfego numa via de circulação rodoviária. No primeiro aplicou-se uma carga de 80 kN durante 10 ciclos a uma velocidade de 1500 N/s, no segundo existiu uma diminuição da força aplicada, sendo esta de 25 kN, em seguida, com a mesma força aumentou-se o número de ciclos para 30, por fim realizou-se a uma velocidade de 1000 N/s um ensaio com ciclos de carga crescente de 5 kN a 80 kN com um incremento de 5 kN por ciclo. Todos os ensaios foram realizados com a aplicação de duas diferenças de potencial, uma de 12 V e outra de 24 V, com exceção do ensaio com a carga cíclica de 80 kN sendo que apenas foi aplicada uma diferença de potencial de 12 V.

Ao longo da realização dos ensaios e da análise de resultados, concluiu-se que a diferente percentagem de negro de fumo, o tipo de carga, bem como a diferença de potencial aplicada influenciou o comportamento piezoresistivo de cada sensor. De facto, de uma vista geral existe uma ligeira melhoria relativamente à piezoresistividade, no

comportamento do sensor com 6.5% quando comparado com o de 4.5%, ou seja, a amplitude da MFR é ligeiramente maior à medida que a força é aplicada, resultando num declive da linha de tendência mais acentuado. Então, quanto maior for o declive da linha de tendência da MFR em relação à deformação do sensor e quanto mais proporcional for esta variação, diminuindo a resistividade do sensor à medida que a força aumenta, mais propício é o sensor a exibir um comportamento piezoresistivo. No entanto os resultados do sensor sem negro de fumo são pouco representativos da realidade, sendo este sensor não constituído por qualquer tipo de condutor elétrico, o comportamento piezoresistivo devia ser inexistente, atribuindo-se o comportamento observado à possível presença de água no sensor.

A determinação do GF do sensor com 4.5% de NF e da amostra 3 do sensor com 6.5% para cada ensaio realizado, foi necessária para uma avaliação mais profunda da piezoresistividade, uma vez que o GF é o parâmetro que quantifica a capacidade piezoresistiva de um material. Através desta análise concluiu-se que, com exceção do ensaio de 25 kN com 30 ciclos a 24 V onde o GF obtido para o sensor com 4.5% foi muito superior ao obtido no sensor com 6.5%, a diminuição da força de carga aplicada e o aumento do número de ciclos converge para um comportamento piezoresistivo mais promissor do sensor. Contudo, também se verifica que para os ensaios com ciclos crescentes de 5 a 80 kN este comportamento é quase inexistente, de facto se cada ciclo for isolado separadamente, a diminuição da resistência do sensor diminui proporcionalmente à medida que a força aumenta, no entanto isto não reflete o ensaio total realizado.

8.2 Perspetiva de trabalhos futuros

Devido à importância que estes sensores possam vir a ter num futuro próximo, seguidamente sugerem-se os possíveis estudos e trabalhos a desenvolver.

A monitorização e gestão de infraestruturas rodoviárias foi o principal incentivo para o desenvolvimento dos sensores, devido a isto, a sua aplicação numa via de circulação é fundamental, desta forma pode ser possível compreender como é que o sensor se comporta quando sujeito a uma situação de tráfego automóvel em tempo real.

No entanto é também necessário perceber como é que a presença de água no sensor afeta o comportamento piezoresistivo do mesmo, uma vez implementados na via de circulação, estes estão sujeitos a diferentes condições meteorológicas.

Referências Bibliográficas

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2001).** *Fundamentals of Electric Circuits. Organization.* <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Azhari, F., & Banthia, N. (2012).** Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cement and Concrete Composites*, 34(7), 866–873. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.007>
- Chary, S. (1951).** Fundamentals of electrical engineering. *Journal of the Franklin Institute*, 252(5), 444. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(51\)90477-2](https://doi.org/10.1016/0016-0032(51)90477-2)
- Chen, B., Li, B., Gao, Y., Ling, T. C., Lu, Z., & Li, Z. (2017).** Investigation on electrically conductive aggregates produced by incorporating carbon fiber and carbon black. *Construction and Building Materials*, 144, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.168>
- Chung, D. D. L. (2002).** Piezoresistive Cement-Based Materials for Strain Sensing. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13(9), 599–609. <https://doi.org/10.1106/104538902031861>
- E-c, T. M. L. P. (2017).** Strain gauges 2017.
- Federal Aviation Administration (FAA)/Aviation Supplies & Academics (ASA). (1999).** *Basic Electricity. Aviation Maintenance Technician Handbook.* Retrieved from https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_handbook/media/FAA-8083-30_Ch10.pdf
- Gauge, T. S. (1998).** Strain Gauge Measurement – A Tutorial What is Strain ?, (August), 1–12.
- Gerhard (Geert) J. Bleys. (2017).** ISOCYANATE-BASED POLYMER FOAM COMPOSITE WITH IMPROVED THERMAL INSULATION PROPERTIES. Retrieved November 20, 2017, from <https://purpatents.com/2014/06/18/improved-black-insulation-foams/>
- Han, B., Ding, S., & Yu, X. (2015).** Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 59,

- 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>
- Han, B., & Ou, J. (2007).** Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 138(2), 294–298. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.05.011>
- International Carbon Black Association. (2017).** What is Carbon Black. Retrieved November 20, 2017, from <http://www.carbon-black.org/index.php/what-is-carbon-black>
- Li, H., & Ou, J. (2011).** Structural health monitoring: From sensing technology stepping to health diagnosis. *Procedia Engineering*, 14, 753–760. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.095>
- Li, H., Xiao, H., & Ou, J. (2008).** Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition. *Composites Science and Technology*, 68(9), 2114–2119. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.03.007>
- Moglen, G. E. (2015).** Fundamentals of. *Power*, 250.
- Monteiro, A. O. (2017).** Development of a multifunctional carbon black/cement composite for traffic monitoring.
- Monteiro, A. O., Cachim, P. B., & Costa, P. M. F. J. (2017).** Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles. *Cement and Concrete Composites*, 81, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.009>
- Monteiro, A. O., Loredó, A., Costa, P. M. F. J., Oeser, M., & Cachim, P. B. (2017).** A pressure-sensitive carbon black cement composite for traffic monitoring. *Construction and Building Materials*, 154, 1079–1086. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.053>
- O, A., J, P. M. F., & B, P. (2017).** Dynamic sensing properties of a multifunctional cement composite with carbon black for traffic monitoring, 1–17.
- Pawlyta, M., Rouzaud, J.-N., & Duber, S. (2015).** Raman microspectroscopy characterization of carbon blacks: Spectral analysis and structural information. *Carbon*, 84, 479–490. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.12.030>

- Shi, L., Lu, Y., & Bai, Y. (2017).** Mechanical and Electrical Characterisation of Steel Fiber and Carbon Black Engineered Cementitious Composites. *Procedia Engineering*, 188, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.491>
- Shi, Z. Q., & Chung, D. D. L. (1999).** Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion. *Cement and Concrete Research*, 29(3), 435–439. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00204-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00204-X)
- Smith, M. (2017).** New developments in carbon fiber. *Reinforced Plastics*, 00(00), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.repl.2017.07.004>
- Wen, S., & Chung, D. D. L. (2007).** Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites. *Carbon*, 45(3), 505–513. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.10.024>
- Xiao, H., Li, H., & Ou, J. (2010).** Modeling of piezoresistivity of carbon black filled cement-based composites under multi-axial strain. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 160(1–2), 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.04.027>

ANEXOS

Ensaio 5 a 80 kN (12V)

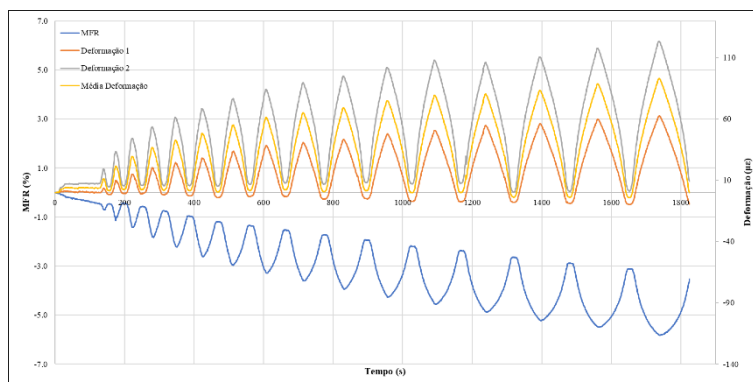


Figura A 1. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 0% de NF

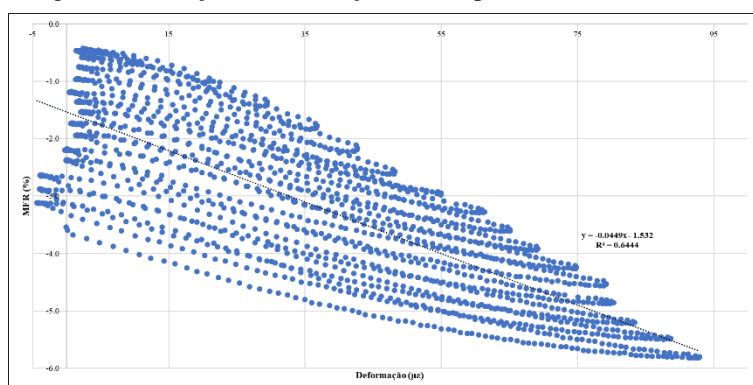


Figura A 2. MFR vs Deformação sensor com 0% de NF

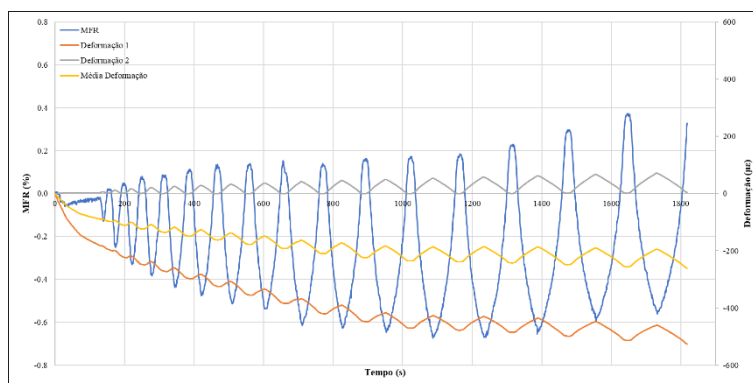


Figura A 3. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 4.5% de NF

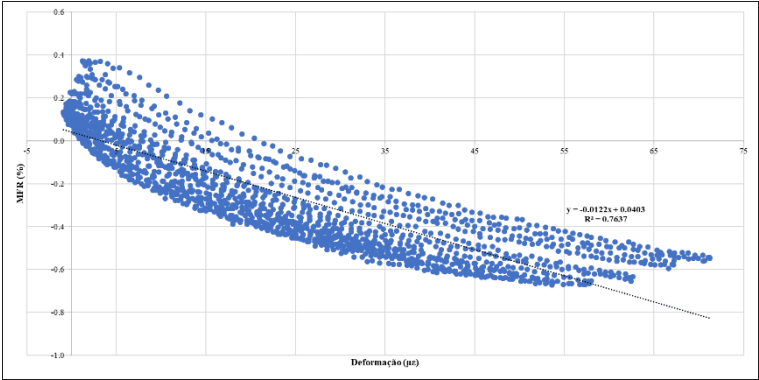


Figura A 4. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF

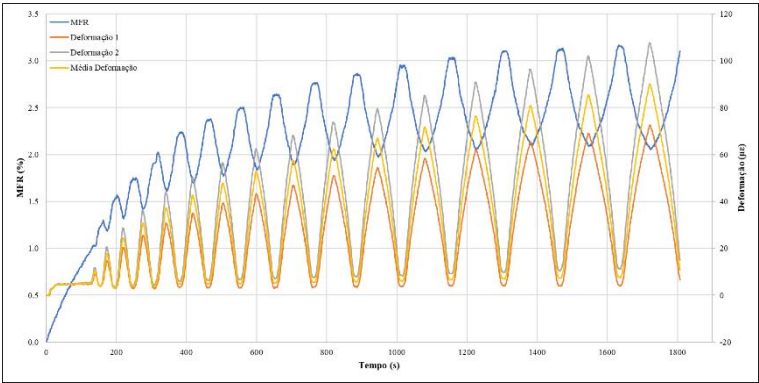


Figura A 5. Força vs Deformação vs Tempo amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

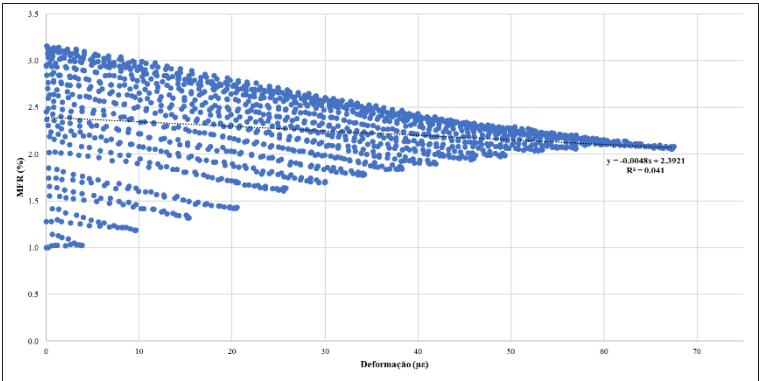


Figura A 6. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

Ensaio 5 a 80 kN (24V)

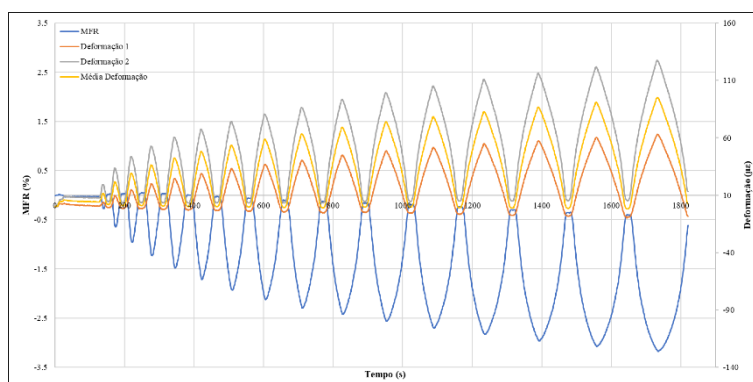


Figura A 7. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 0% de NF

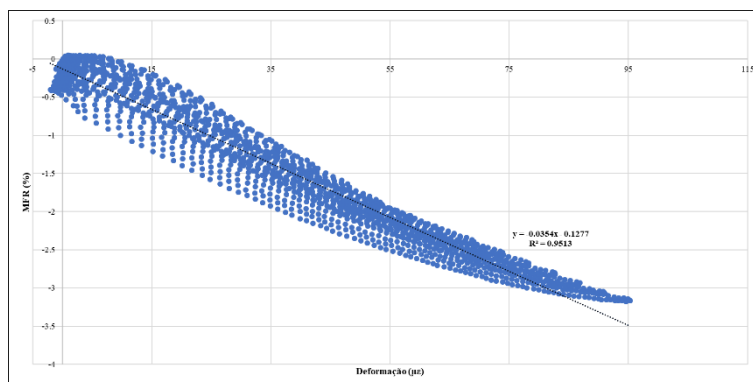


Figura A 8. MFR vs Deformação sensor com 0% de NF

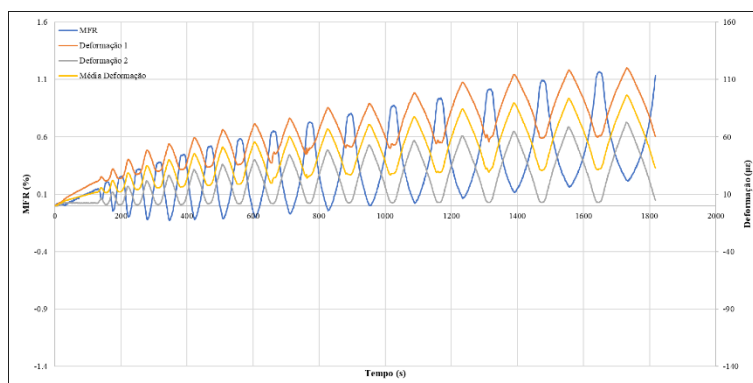


Figura A 9. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 4.5% de NF

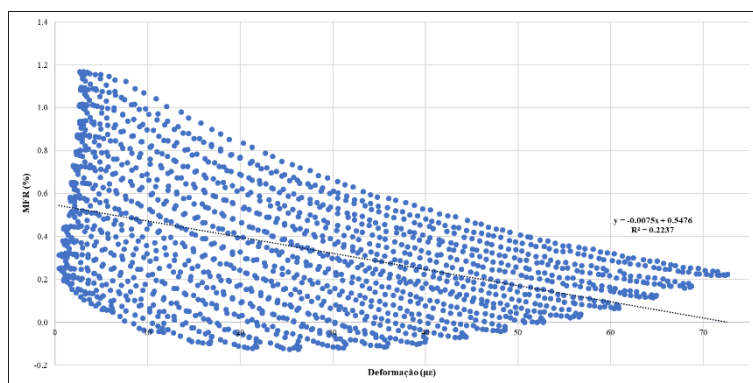


Figura A 10. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF

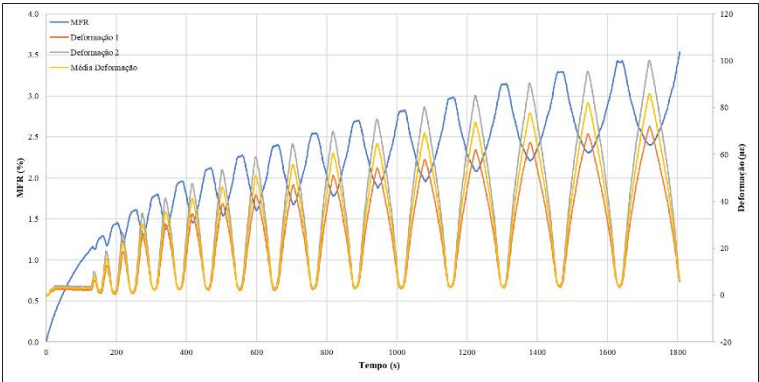


Figura A 11. Força vs Deformação vs Tempo amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

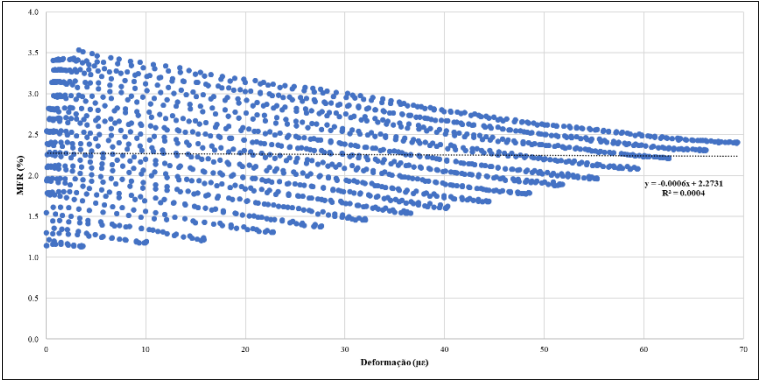


Figura A 12. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

Ensaio 25 kN 10 ciclos (12V)

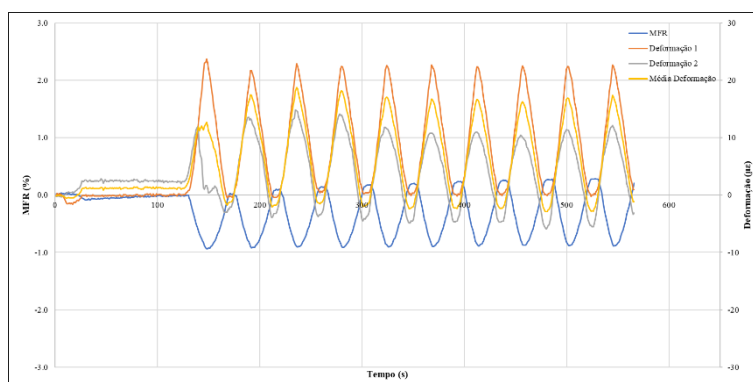


Figura A 13. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 0% de NF

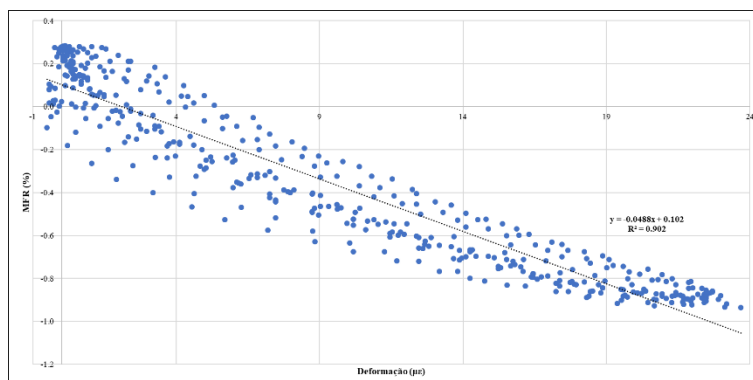


Figura A 14. MFR vs Deformação sensor com 0% de NF

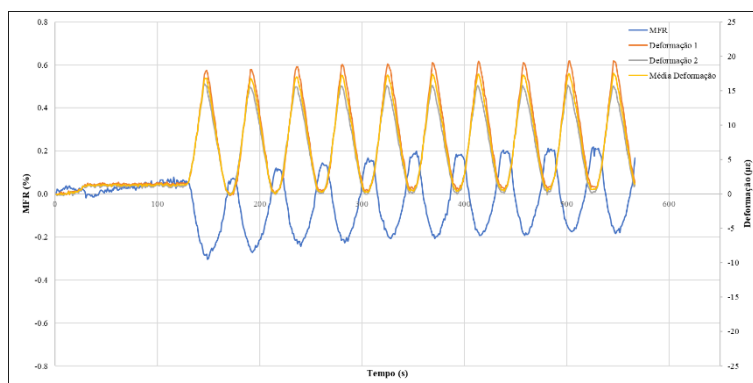


Figura A 15. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 4.5% de NF

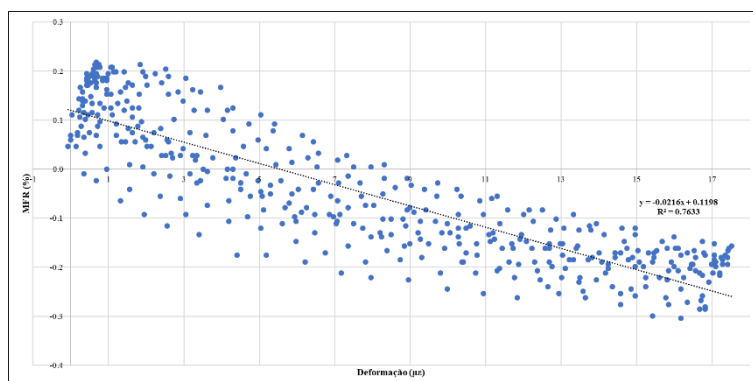


Figura A 16. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF

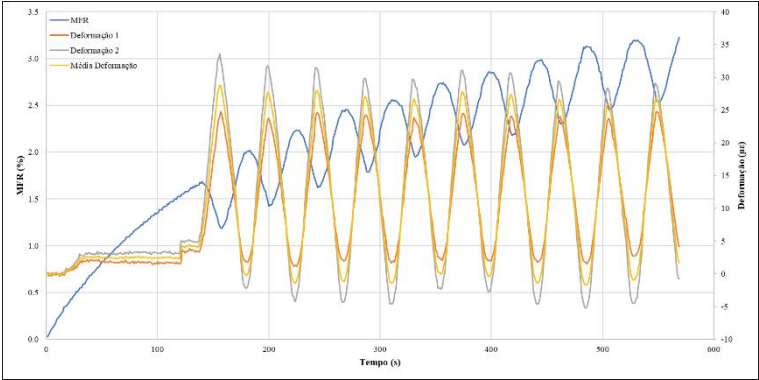


Figura A 17. Força vs Deformação vs Tempo amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

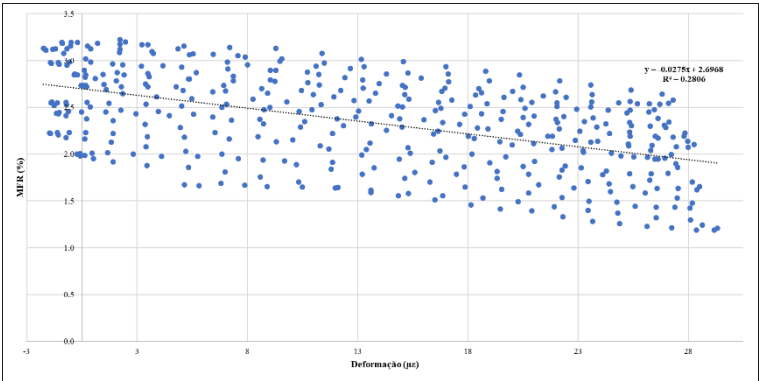


Figura A 18. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

Ensaio 25 kN 10 ciclos (24V)

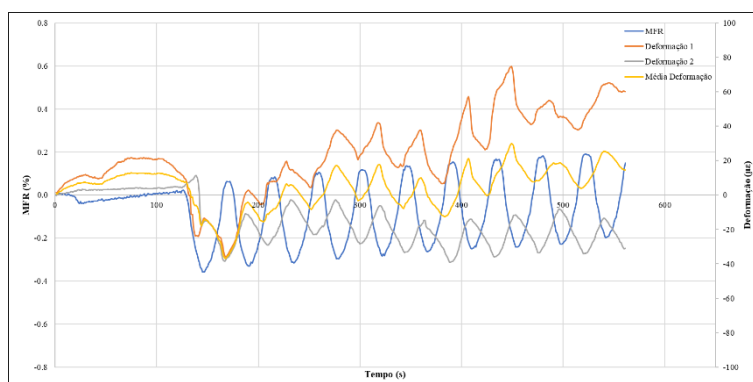


Figura A 19. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 4.5% de NF

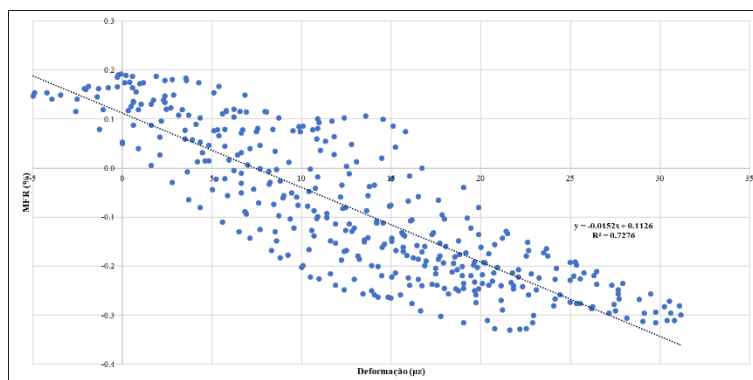


Figura A 20. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF

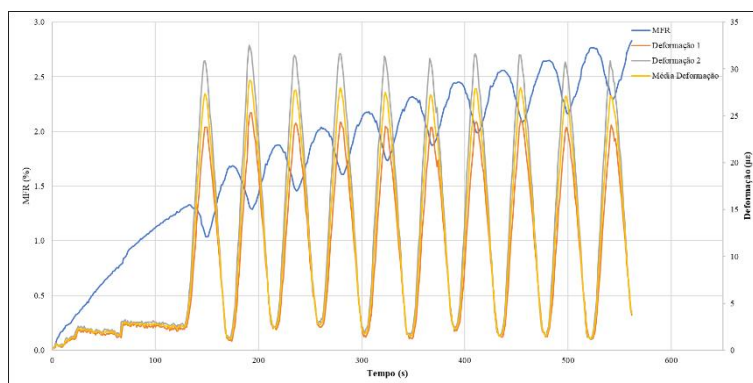


Figura A 21. Força vs Deformação vs Tempo amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

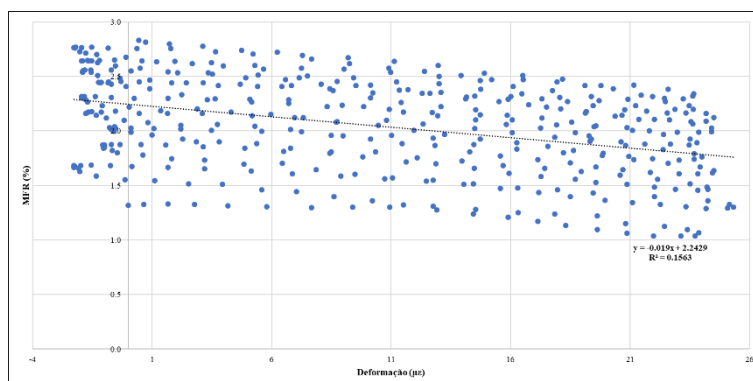


Figura A 22. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

Ensaio 25 kN 30 ciclos (12V)

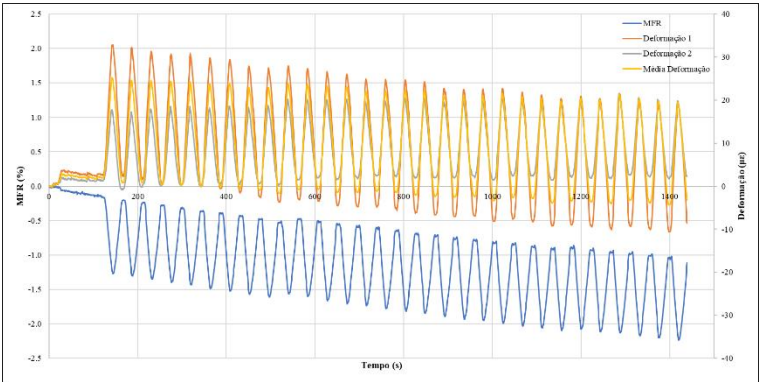


Figura A 23. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 0% de NF

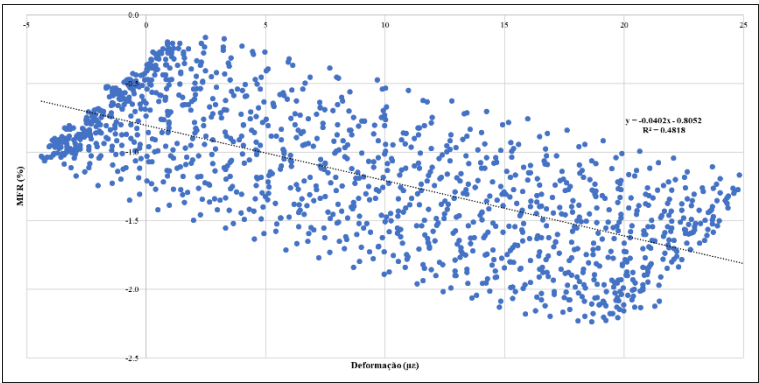


Figura A 24. MFR vs Deformação sensor com 0% de NF

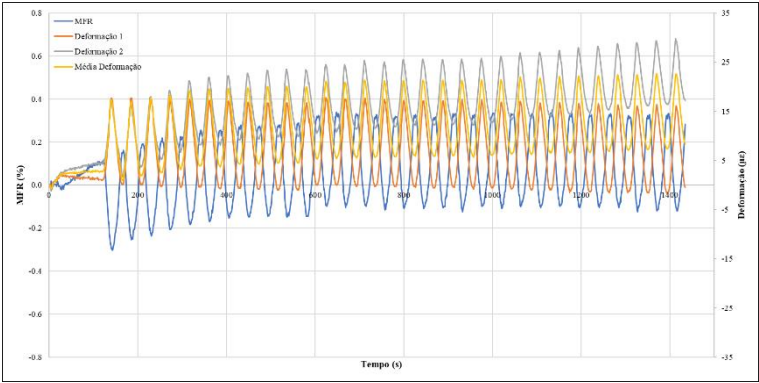


Figura A 25. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 4.5% de NF

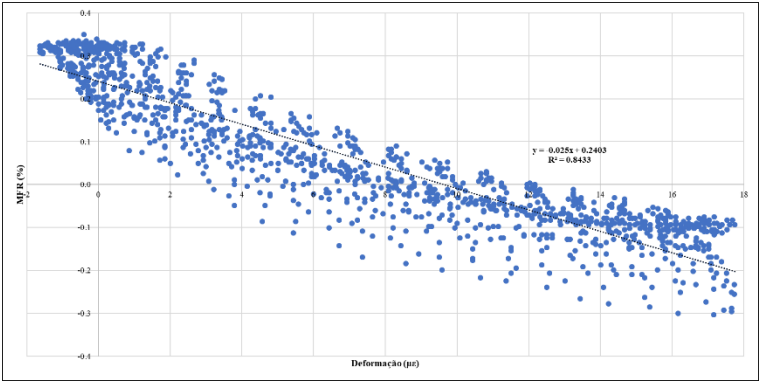


Figura A 26. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF

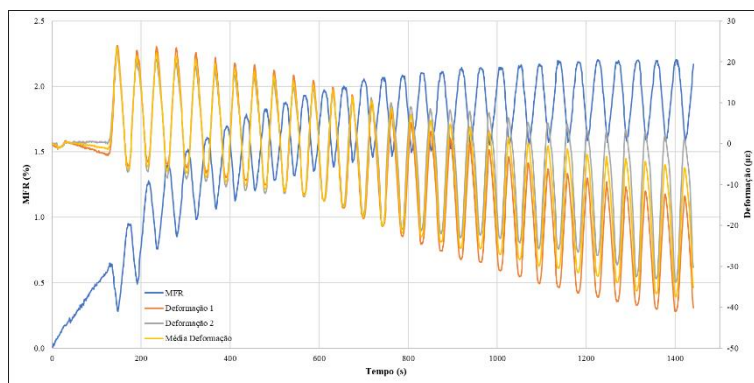


Figura A 27. Força vs Deformação vs Tempo amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

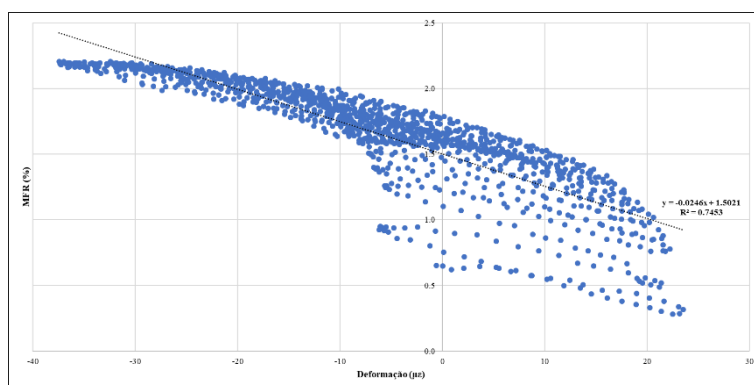


Figura A 28. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

Ensaio 25 kN 30 ciclos (24V)

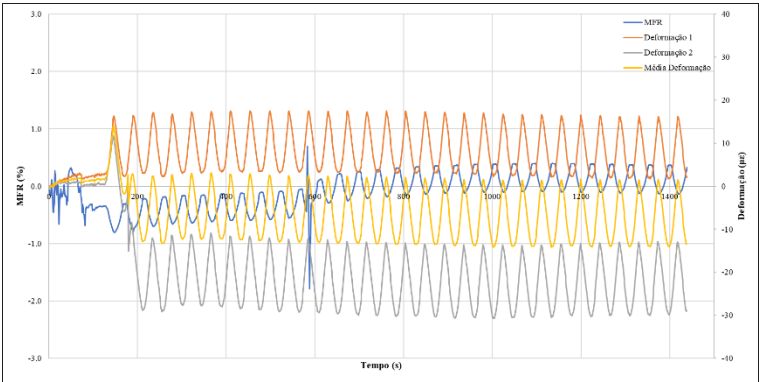


Figura A 29. Força vs Deformação vs Tempo sensor com 4.5% de NF

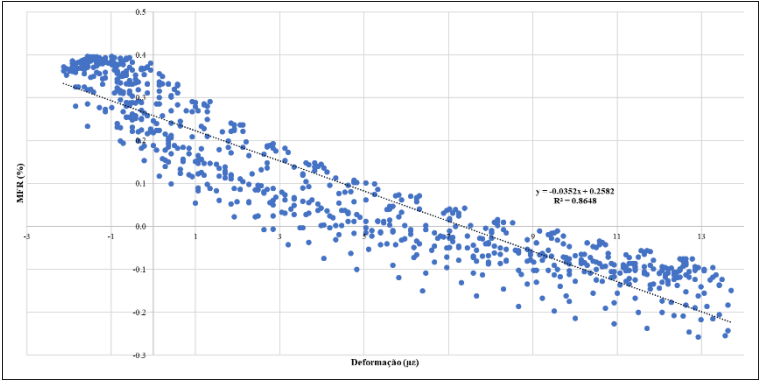


Figura A 30. MFR vs Deformação sensor com 4.5% de NF

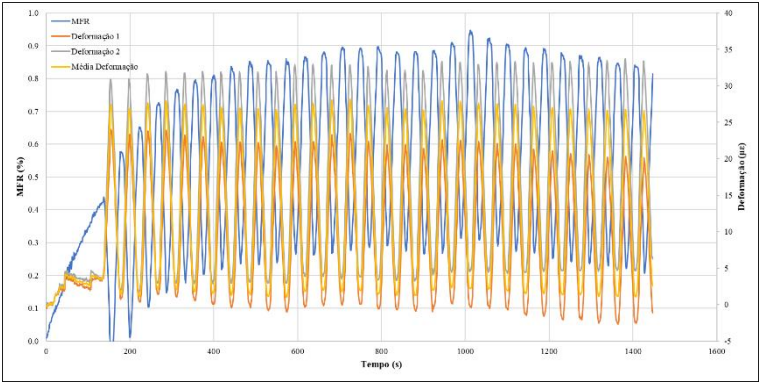


Figura A 31. Força vs Deformação vs Tempo amostra 3 do sensor com 6.5% de NF

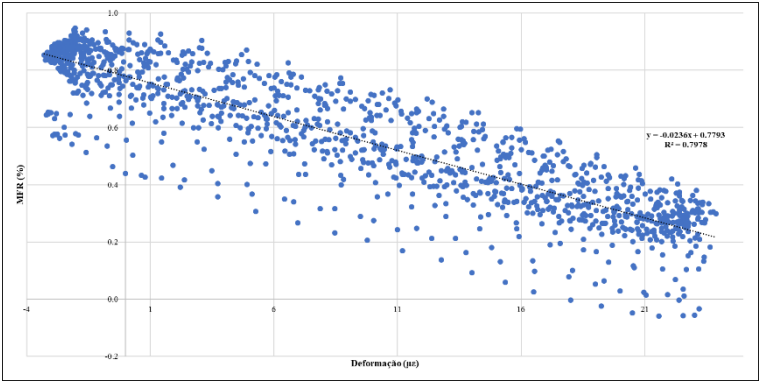


Figura A 32. MFR vs Deformação amostra 3 do sensor com 6.5% de NF